

СИБИРСКИЙ РАДИОГЕЛИОГРАФ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH: FIRST RESULTS****С.В. Лесовой***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com***А.Т. Алтынцева***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
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия***В.В. Гречнев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grechnev@iszf.irk.ru***А.В. Губин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, gubin@iszf.irk.ru***Д.А. Жданов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zhdanov@iszf.irk.ru***Е.Ф. Иванов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eugenessrt@gmail.com***А.М. Уралов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, uralov@iszf.irk.ru***Л.К. Кашапова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lkk@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия***А.А. Кузнецов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, a_kuzn@iszf.irk.ru***Н.С. Мешалкина***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru***Р.А. Сыч***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sych@iszf.irk.ru***S.V. Lesovoi***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, svlesovoi@gmail.com***A.T. Altyntseva***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
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia***V.V. Grechnev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grechnev@iszf.irk.ru***A.V. Gubin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, gubin@iszf.irk.ru***D.A. Zhdanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zhdanov@iszf.irk.ru***E.F. Ivanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eugenessrt@gmail.com***A.M. Uralov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, uralov@iszf.irk.ru***L.K. Kashapova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lkk@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia***A.A. Kuznetsov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, a_kuzn@iszf.irk.ru***N.S. Meshalkina***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru***R.A. Sych***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sych@iszf.irk.ru*

Аннотация. Начаты регулярные наблюдения активных процессов в атмосфере Солнца с помощью первой очереди многоволнового Сибирского радиогелиографа — Т-образной 48-антенной решетки с диапазоном рабочих частот 4–8 ГГц и мгновенной полосой приема 10 МГц. Антенны установлены на центральных антенных постах Сибирского солнечного радиотелескопа, максимальная база 107.4 м, угловое разрешение до 70". Приведены примеры наблюдений диска Солнца на различных частотах, «отрицательных» всплесков и солнечных вспышек. Чувствительность по компактным источникам достигает 0.01 солнечных единиц потока ($\approx 10^{-4}$ от полного потока Солнца) при времени накопления 0.3 с. Высокая чувствительность радиогелиографа обеспечивает мониторинг солнечной активности и

Abstract. Regular observations of active processes in the solar atmosphere have been started using the first stage of the multiwave Siberian Radioheliograph (SRH), a T-shaped 48-antenna array with a 4–8 GHz operating frequency range and a 10 MHz instantaneous receiving band. Antennas are set on the central antenna posts of the Siberian Solar Radio Telescope. The maximum baseline is 107.4 m, and the angular resolution is up to 70". We present examples of observations of the solar disk at different frequencies, "negative" bursts, and solar flares. The sensitivity to compact sources reaches 0.01 solar flux units ($\approx 10^{-4}$ of the total solar flux) with an accumulation time of 0.3 s. The high sensitivity of the SRH enables monitoring of solar activity and allows one to study active processes from characteristics of their microwave emission,

позволяет исследовать активные процессы по характеристикам их микроволнового излучения, включая сверхслабые события, не регистрировавшиеся ранее.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение, солнечные вспышки, радиотелескопы, отрицательные всплески.

including faint events, which could not be detected previously.

Keywords: Sun, radio emission, solar flares, radio telescopes, negative bursts.

I. ВВЕДЕНИЕ

В Институте солнечно-земной физики СО РАН создан крупнейший комплекс инструментов для наземных наблюдений различных явлений космической погоды и их источников — от событий в атмосфере Солнца до возмущений ионосферной плазмы. Видное место как в этом комплексе, так и в международной кооперации занимает инструментарий для мониторинга и диагностики солнечных активных процессов радиоастрономическими методами. Наряду с задачами фундаментальной физики Солнца радионаблюдения важны для решения прикладных задач, особенно в России, где до настоящего времени не налажен систематический мониторинг солнечной активности с помощью внеатмосферных космических технологий.

Радиотелескопы расположены в Радиоастрофизической обсерватории (РАО) (урочище Бадары, Бурятская республика). Наблюдения Солнца проводятся в течение светового дня с 00 до 10 UT летом и с 02 до 08 UT зимой. Благодаря удаленности обсерватории от населенных пунктов уровень радиопомех низок. В обсерватории создается многоволновый Сибирский радиогелиограф (СРГ, рис. 1) и работает ряд спектрополяриметров интегрального излучения Солнца, перекрывающих диапазон принимаемых частот от 50 МГц до 24 ГГц. В диапазоне рабочих частот 4–8 ГГц первой очереди СРГ доступны данные наблюдений Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра (BBMS) [Zhdanov, Zandanov, 2015].

Данные наблюдений на радиотелескопах РАО используются российскими и зарубежными учеными в исследованиях фундаментальных проблем физики Солнца, в том числе в рамках международных программ. Перспективами использования данных наблюдений для решения прикладных задач обусловлен значительный вклад Института прикладной геофизики Росгидромета в развитие комплекса радиотелескопов. Данные радиомониторинга солнечной активности, в том числе в реальном времени, доступны на сайте обсерватории [<http://badary.iszf.irk.ru>].

Радиоастрономические наблюдения предоставляют уникальную информацию о процессах нагрева плазмы и ускорения частиц в атмосфере Солнца. Интегральный поток излучения Солнца на частоте 2.8 ГГц (так называемый индекс 10.7 см) является наиболее объективной оценкой текущего уровня солнечной активности и ее изменчивости на протяжении нескольких солнечных циклов. Индекс 10.7 см используется в качестве входного параметра в различных моделях околоземной среды — магнитосферы и ионосферы.

Достоинством мониторинга солнечной активности в радиодиапазоне является его всепогодность, так как атмосферные условия слабо влияют на при-

нимаемый сигнал. Относительно невысока стоимость радиотелескопов по сравнению с внеатмосферными технологиями и инструментами оптического диапазона. Прозрачность солнечной плазмы для радиоизлучения увеличивается с ростом его частоты. Окно прозрачности земной атмосферы для радиоволн обеспечивает прием наземными обсерваториями солнечного радиоизлучения от десятков МГц до сотен ГГц и получение информации из областей излучения от хромосферы до верхней короны. Обширен и диапазон изучаемых временных масштабов — от импульсов миллисекундной длительности, генерируемых в аномально ярких компактных источниках когерентными механизмами, до многолетних циклов солнечной активности.

Информация о некоторых параметрах плазмы в короне Солнца может быть получена только из радионаблюдений. Геоэффективный потенциал выбросов (эрупций) солнечной замагниченной плазмы, вызывающих спорадические возмущения околоземной среды, определяется корональными магнитными полями, а темп и интенсивность эруптивных процессов — динамикой высвобождения магнитной энергии и ее конверсии в энергию частиц плазмы и излучение. Поэтому одна из важнейших задач мониторинга — отслеживание эволюции магнитных структур в короне Солнца. Возможности соответствующих наблюдений в оптическом диапазоне ограничены, поскольку яркость магнитоактивных линий в излучении короны не достаточна для их выделения на фоне излучения фотосферы. В то же время спектр и поляризация микроволнового излучения существенно зависят от величины и направления вектора магнитного поля в источнике. Магнитография короны становится возможной с созданием нового поколения радиогелиографов, позволяющих получать последовательности изображений диска Солнца на различных частотах (см., например, [Lang et al., 1993; Wang et al., 2015]). Важной особенностью радиомониторинга является высокая чувствительность к излучению нетепловых электронов. Обнаружимое радионаблюдениями нетепловое излучение может генерироваться в областях короны со столь низкой концентрацией фоновой плазмы, что их жесткое рентгеновское излучение не регистрируется рентгеновскими телескопами.

Наблюдения эруптивных процессов в короне Солнца необходимы для совершенствования физических основ прогноза и диагностики таких геоэффективных явлений, как солнечные вспышки и корональные выбросы массы. Регулярные наблюдения могут использоваться для мониторинга солнечной активности в реальном времени. Радиогелиографы позволяют регистрировать всплески микроволнового излучения, связанные с процессами энерговыделения,



Рис. 1. Центральная часть антенной решетки СРГ и северный луч ССРТ

и определять положение их источников на диске Солнца. При развитии вспышечных процессов наблюдаются всплески радиоизлучения, интенсивность которых может превышать его фоновые значения в миллионы раз. Данные о спектре спорадического излучения и его источниках являются одним из важнейших средств диагностики спорадической солнечной активности. Мониторинг спектрального состава и интенсивности мощных радиовсплесков необходим для анализа причин сбоев в работе электронных систем на космических аппаратах, радаров, систем навигации и связи, а обобщение и систематизация этих данных важны для разработчиков аппаратуры.

Среди задач наблюдений в микроволновом диапазоне — выделение прогностических признаков генерации мощных солнечных вспышек, возбуждения ударных волн и появления в межпланетном пространстве потоков ускоренных электронов и протонов.

Поскольку угловое разрешение телескопов определяется отношением длины волны принимаемого излучения к их апертуре, для наблюдений эволюции структуры активных областей и вспышечных источников необходимо создание инструментов размерами в сотни метров. Для решения перечисленных задач важно сочетание достаточно высокого пространственного разрешения с широким полем зрения, превышающим размеры солнечного диска. Это возможно с помощью многоэлементных интерферометров. Их пространственное разрешение определяется размерами антенной решетки, а поле зрения — шириной диаграммы направленности отдельных антенных элементов. Спектральное разрешение должно быть достаточно высоким для идентификации механизмов излучения, выделения областей с оптически тонким и толстым излучением, определения характеристик излучающих электронов и т. д.

Важной информацией о механизмах генерации наблюдаемого излучения является его поляризация, до настоящего времени недостаточно используемая при интерпретации наблюдений из-за ее существенной зависимости от пространственной структуры

источников. Оценки параметров излучающей плазмы осложняются эффектами распространения электромагнитных волн в окружающей их источник плазме. Эти эффекты приводят к поглощению сигнала, обращению знака круговой поляризации, рассеянию излучения. С другой стороны, если эти эффекты существенны, они позволяют определять параметры плазмы на пути распространения излучения к наблюдателю.

До недавнего времени основным инструментом радиоастрономического комплекса ИСЗФ СО РАН являлся ССРТ, наблюдения на котором начались в 1986 г. [Smolkov et al., 1986; Grechnev et al., 2003]. ССРТ включен в список уникальных установок России, а коллектив создателей был награжден Премией правительства РФ. Накоплен большой объем цифровых данных ежедневных наблюдений на частоте 5.7 ГГц в течение светового дня в виде двумерных радиокарт и одномерных распределений радиояркости. В настоящее время на основе ССРТ создается новый инструмент — многоволновый Сибирский радиогелиограф [Lesovoi et al., 2014]. В 2016 г. начаты наблюдения на первой очереди СРГ-48 в диапазоне частот 4–8 ГГц с 48-антенной решеткой.

Одновременное получение изображений Солнца было возможно на трех частотах — 5.7 ГГц на ССРТ и 17 и 34 ГГц на японском радиогелиографе Нобеяма (NoRH) [Nakajima et al., 1995], наблюдательное время которого с 23 до 06 UT имеет значительное перекрытие с ССРТ. Есть перекрытие и с радиотелескопом РАТАН-600, на котором получают одномерные распределения радиояркости по диску Солнца с высоким спектральным разрешением [Bogod, 2011; Kaltman et al., 2015] в широком диапазоне частот. Многоволновые наблюдения несут богатую информацию о спокойной солнечной атмосфере и активных процессах в ней, а совместный анализ микроволновых наблюдений с данными других диапазонов дает уникальный материал для понимания различных солнечных процессов, их взаимосвязи и влияния на околоземную среду (см., например, [Алтынцев, Кашапова, 2014]). Современное состояние цифровой электроники и вычислительной техники позволяет создавать многоэлементные радиоинтерферометры, позволяющие с

высокой скоростью получать изображения Солнца на ряде частот практически одновременно.

Актуальность развития нового поколения радиогелиографов подтверждается реализацией в настоящее время нескольких проектов. В микроволновом диапазоне наиболее крупными (с базой около километра и более) являются американский Frequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) [Bastian et al., 1998] и китайский Mingantu Ultrawide Spectral Radioheliograph (MUSER) [Yan et al., 2009]. В настоящее время проекты находятся на разных стадиях реализации. По проекту FASR для разработки и тестирования систем радиогелиографа используется Expanded Owens Valley Solar Array (18 антенн, диапазон 1–9 ГГц). Ведутся работы по увеличению количества антенн и расширению диапазона принимаемых частот до 2.5–18 ГГц [Gary et al., 2012]. На китайском радиогелиографе Минганту, расположенном во Внутренней Монголии, выполнен монтаж антенных систем CSRH-I (40 антенн, 0.4–2.0 ГГц) и CSRH-II (60 антенн, 2–15 ГГц). В настоящее время решаются вопросы фазовой калибровки, начаты пробные наблюдения на отдельных частотах.

В настоящей статье представлены предварительные результаты наблюдений на первой очереди СРГ с 48-антенной Т-образной решеткой в диапазоне частот 4–8 ГГц. Пробные наблюдения на отдельных частотах выполнялись с начала 2016 г. С июля 2016 г. ведутся рутинные наблюдения на СРГ-48 на пяти частотах. В этот период солнечная активность была низкой, что позволило оценить возможности нового инструмента при исследовании слабых событий, недоступных для регистрации телескопами интегрального потока.

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА С 48-АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Сибирский солнечный радиотелескоп, на базе которого создается Сибирский радиогелиограф, имеет следующие характеристики [Grechnev et al., 2003]. ССРТ — крестообразный интерферометр, состоящий из двух линеек антенн В–З и С–Ю по 128 антенн диаметром 2.5 м каждая. Расстояние между крайними антеннами составляет 622.3 м, что определяет угловое разрешение до 21" в двумерных изображениях и до 15" в одномерных распределениях радиояркости. Измеряются потоки в обеих круговых поляризациях (RCP и LCP). Период модуляции поляризации 14 мс определяет предельное временное разрешение одномерных измерений. Двумерные изображения формируются вследствие изменения положения Солнца относительно интерференционных максимумов, во первых, из-за одновременного приема на разных частотах в полосе 5.67–5.79 ГГц и, во-вторых, из-за суточного вращения Земли. Последнее определяет время прохождения интерференционного максимума по диску Солнца, поэтому получение изображений на ССРТ возможно не чаще, чем через 2–3 мин.

Метод построения изображений Сибирским радиогелиографом принципиально иной — фурье-синтез [Lesovoi et al., 2014]. Временное разрешение, определяемое характеристиками регистрирующей аппаратуры, на порядки выше. В настоящее время ведутся регулярные наблюдения с помощью 48-элементной решетки, антенны которой установлены на центральных антенных постах ССРТ вдоль восточного, западного и южного лучей. Продолжаются юстировка и отладка систем СРГ-48. Частоты приема солнечного излучения с полосой 10 МГц каждая задаются программой управления в диапазоне 4–8 ГГц. Интервал между измерениями на одной частоте — 0.84 с, время переключения частоты приема — около 2 с. Максимальная база составляет 107.4 м, пространственное разрешение достигает 70" на 8 ГГц. Принимаются обе круговые поляризации излучения, а чувствительность по компактным источникам достигает 10^{-4} полного потока Солнца [Лесовой, Кобец, 2017].

Количество принимаемых частотных каналов можно менять в зависимости от задачи наблюдений. В наблюдениях квазистационарных источников, таких, например, как пятенные источники, список сканируемых частот может составлять несколько сотен для достижения требуемого спектрального разрешения. При исследовании вспыхивающих событий требуется высокое временное разрешение, для достижения которого можно ограничить количество частотных каналов. С 1 июля 2016 г. наблюдения ведутся на пяти частотах — 4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5 ГГц. Данные, необходимые для построения радиокарт, доступны на [ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48]. Разработано и тестируется программное обеспечение, позволяющее строить «сырые» изображения Солнца, производить их чистку и калибровать в единицах яркостной температуры. Прорабатываются форматы данных для хранения и программное обеспечение для их первичной обработки в режиме удаленного доступа.

Одновременно с наблюдениями на СРГ-48 продолжается получение изображений Солнца на частоте 5.7 ГГц оставшимися антеннами ССРТ в первоначальном режиме. Использование всех антенн северного луча и крайних антенн остальных лучей позволяет получать двумерные изображения компактных образований в атмосфере Солнца с разрешением до 21" и интервалом 2–3 мин. Ежедневные карты в интенсивности и круговой поляризации, полученные вблизи местного полудня, доступны на [ftp://badary.iszf.irk.ru].

Мониторинг солнечной активности и контроль работы основных систем СРГ осуществляются с помощью корреляционных кривых, являющихся аналогом радиопотока и наглядно представляющих изменения во времени суммы кросскорреляций всех пар антенн. Методы расчета корреляционных кривых и их связь с характеристиками излучения Солнца представлены в работе [Лесовой, Кобец, 2017]. Изменения на корреляционных кривых связаны с вариациями как яркости источников, так и их структуры. Корреляционные кривые приводятся в реальном времени на <http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>.

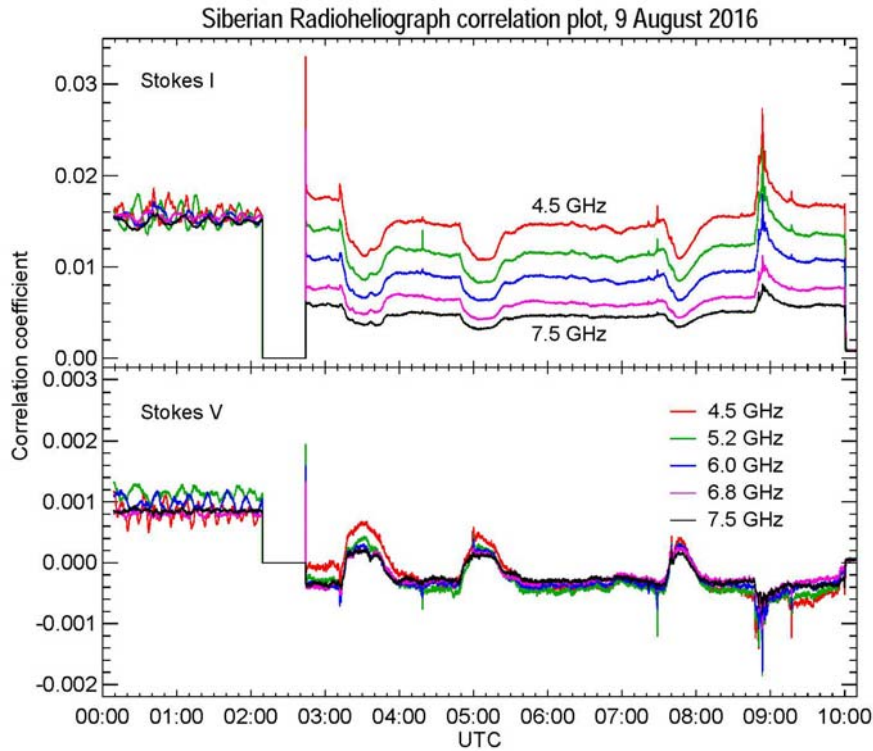


Рис. 2. Корреляционные кривые 9 августа 2016 г. с тремя отрицательными всплесками и вспышкой C2.5 в 08:55 UT

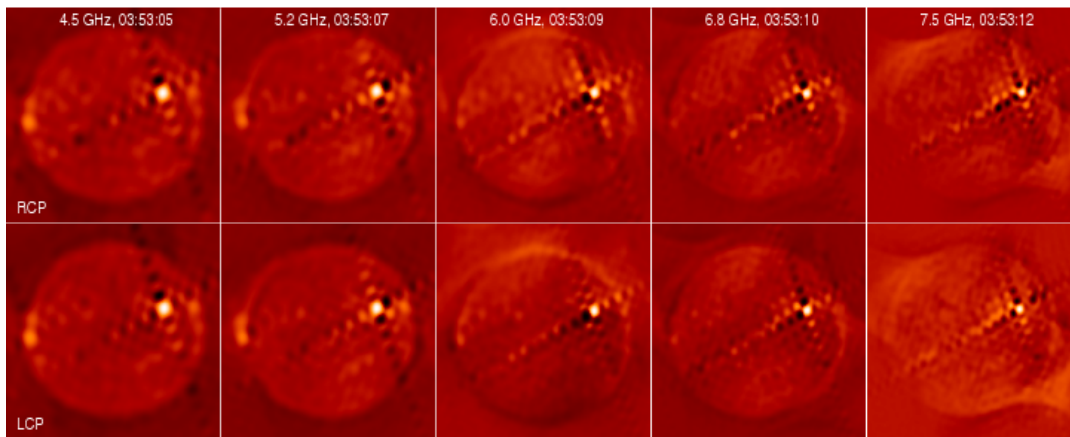


Рис. 3. Изображения диска Солнца на пяти частотах 9 июня 2016 г. в правой (RCP) и левой (LCP) круговой поляризации

Пример корреляционной кривой 9 августа 2016 г. на рис. 2 интересен наличием трех отрицательных всплесков и последующей вспышки рентгеновского класса C2.5 в активной области 12574 (N04E59). В начале этого дня на СРГ проводились регламентные работы, наблюдения начались в 02:45 UT.

На рис. 3 представлен пример набора изображений Солнца на пяти частотах в правой и левой поляризации, полученных без использования процедур очистки изображений от вклада боковых лепестков интерферометра. Яркий источник на северо-западе является откликом на активную область NOAA 12571. Боковые лепестки выглядят как узкие «зебры-полоски». На изображениях с частотами ниже 6 ГГц видно также уярчение на восточном лимбе, которое связано с восходящими активными областями. Поле зрения на приведенных изображениях на треть превышает размер диска Солнца. Видимые размеры ярких компактных источников уменьшаются на

больших частотах, так как они определяются сверткой с диаграммой направленности интерферометра, которая уменьшается с ростом частоты.

Для калибровки изображений в яркостных температурах усовершенствована методика, используемая на NoRH и CCPT. По изображениям строятся распределения яркости для областей, занятых солнечным диском и небом. Разность между положениями максимумов гистограмм соответствует яркостной температуре спокойного Солнца [Kochanov et al., 2013]. Эта температура, снижающаяся с ростом частоты, определяется по данным измерений [Zirin et al., 1991; Vorovik, 1994]. В частности, на указанных выше пяти частотах приняты значения 18.7, 17.1, 15.4, 14.3, и 13.5 тысяч Кельвин. Яркостные температуры изображений компактных источников могут быть ниже истинных, если реальные размеры источников меньше диаграммы направленности СРГ-48.

III. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В результате поглощения излучения компактных радиоисточников или областей спокойного Солнца в экранирующей их низкотемпературной плазме, извергнутой в корону при эрупциях, возникают отрицательные всплески — временные депрессии радиопотока ниже квазистационарного уровня. Зависимость глубины поглощения от частоты экранируемого излучения и свойств поглощающей плазмы позволяет оценить температуру, плотность и размеры эруптивной структуры, если радиопоглощение наблюдается на нескольких частотах [Grechnev et al., 2013]. Отрицательные всплески несут существенную информацию об эруптивных событиях, но наблюдаются редко. Наибольшее их число за год (14) было зарегистрировано всеми наземными станциями в 1991 г. Наблюдение трех отрицательных всплесков за один день 9 августа 2016 г. беспрецедентно (рис. 2).

Судя по полученным на СРГ изображениям, эти отрицательные всплески были вызваны снижением яркости северного источника вблизи восточного лимба. Максимум его яркостной температуры вблизи минимума первого отрицательного всплеска на рис. 4, *а* составлял 0.22 МК. После окончания отрицательного всплеска яркостная температура затенявшегося источника возросла до 0.53 МК (рис. 4, *б*), тогда как у трех прочих источников ее изменение не превышало 13 %. Последнее значение является верхней границей суммарной ошибки измерения яркостных температур по данным СРГ вследствие нестабильности калибровки и неравномерности по полю изображения. Яркостные температуры понижены относительно обычно наблюдаемых величин, что обусловлено недостаточным пространственным разрешением текущей конфигурации СРГ-48.

На рис. 5 приведены временные профили потока затенявшегося микроволнового источника в интенсивности и поляризации, построенные по 2537 парам изображений, полученным с интервалом 8.4 с. Сравнение с интегральным потоком солнечного излучения на частоте 3.75 ГГц, записанным радиополариметрами Нобеема (NoRP) с интервалом 1 с, демонстрирует солнечное происхождение отрицательных всплесков и высокую чувствительность СРГ. При депрессиях интенсивности, достигавших -5 с.е.п. (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м² ГГц)) на частоте 5.2 ГГц, поляризация смещалась в сторону положительных значений, что соответствует затенению левополяризованного источника (рис. 4, *в*, *г*).

Корональных выбросов массы в связи с отрицательными всплесками не зарегистрировано, а наблюдений Солнца на SDO/AIA в этот день не было. Поднимающиеся струи вещества (серджи) удалось обнаружить на изображениях в ультрафиолетовом канале 304 Å космической обсерватории STEREO-A, располагавшейся на орбите Земли восточнее ее на 152°. Изображения, приведенные на рис. 6, — негативы дисперсионных карт, выявляющих все изменения на изображениях. Каждая точка такой карты

представляет дисперсию значений в этой точке по всем изображениям, полученным в данном интервале времени [Grechnev, 2003]. Рамкой обозначена область, вариации потока в которой приведены на рис. 5, *г*. Появлению отрицательных всплесков однозначно соответствуют серджи, экранировавшие микроволновый источник. Дальнейший анализ этих отрицательных всплесков позволит оценить параметры серджей.

Наряду с высокой чувствительностью регистрирующая система СРГ обладает достаточно широким динамическим диапазоном для наблюдений микроволнового излучения вспышек без использования аттенуаторов. На рис. 7 показаны корреляционные кривые с тремя мощными вспышками М-класса: M5.0 (02:11), M7.6 (05:16) и M5.5 (05:31 UT), записанные 23 июля 2016 г. Наиболее интенсивным был микроволновый всплеск в последней вспышке, поток которого на частотах СРГ превосходил 800 с.е.п. В интервале 05:28:30–05:30:30 UT наблюдается смена знака поляризации в полосе СРГ (рис. 8). Инверсия поляризации вспышечного микроволнового излучения может быть вызвана разными причинами. Для их выяснения необходимы дальнейшие исследования данных с пространственным разрешением.

Рис. 9 представляет корреляционные кривые вспышки M7.6 18 апреля 2016 г. При общем согласии данных СРГ (рис. 9, *а*) и NoRH (рис. 9, *б*, *в*), временной профиль всплеска, как обычно, становится более резким с повышением частоты. Это событие интересно выраженными широкополосными колебаниями интенсивности микроволнового излучения с периодом около 30 с.

Как правило, диапазон приема СРГ 4–8 ГГц не охватывает весь спектр гиросинхротронного излучения мощных солнечных вспышек, который может простирается до нескольких десятков ГГц. Тем не менее, изображения, полученные СРГ, позволяют выделить важные вспышечные структуры — например, обнаружить высокие вспышечные петли, невидимые на высоких частотах [Altynsev et al., 2016; Fleishman et al., 2016]. У большинства умеренных и слабых микроволновых всплесков максимум спектра находится в полосе частот СРГ или близко к ней [Nita et al., 2004].

Для изучения сложных солнечных явлений перспективен совместный анализ наблюдений на СРГ и данных других диапазонов солнечного излучения. В качестве примера дан предварительный анализ эруптивной вспышки C2.2 16 марта 2016 г. До начала этого события на СРГ проводились регламентные работы. Антенны были наведены на Солнце около 06:36 UT. СРГ наблюдал это событие на частоте 6 ГГц с интервалом между изображениями 1 с.

На рис. 10 представлена эрупция протуберанца вблизи западного лимба, наблюдавшаяся в канале 304 Å телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [Lemen et al., 2012] космической обсерватории SDO. Дугами разных стилей на рис. 10, *а–г* обведен верхний край поднимающегося протуберанца, а на рис. 10, *д* штриховой кривой показана аппроксимация его ускорения, достигавшего 1.8 км/с².

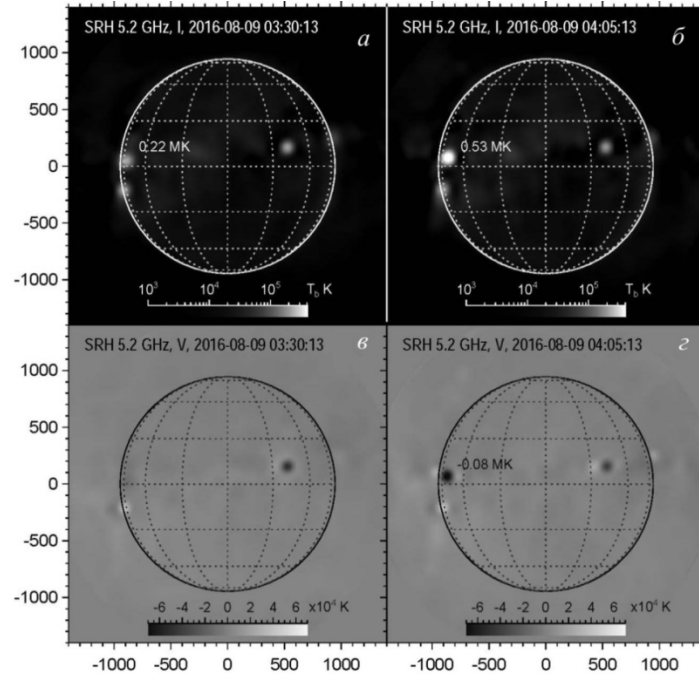


Рис. 4. Радиоизображения Солнца, полученные СРГ (SRH — Siberian Radioheliograph) на 5.2 ГГц в интенсивности и поляризации (после чистки) во время первого отрицательного всплеска (слева) и после него (справа). Отрицательный всплеск связан с затенением северного источника у восточного лимба. По осям указаны угловые секунды от центра солнечного диска

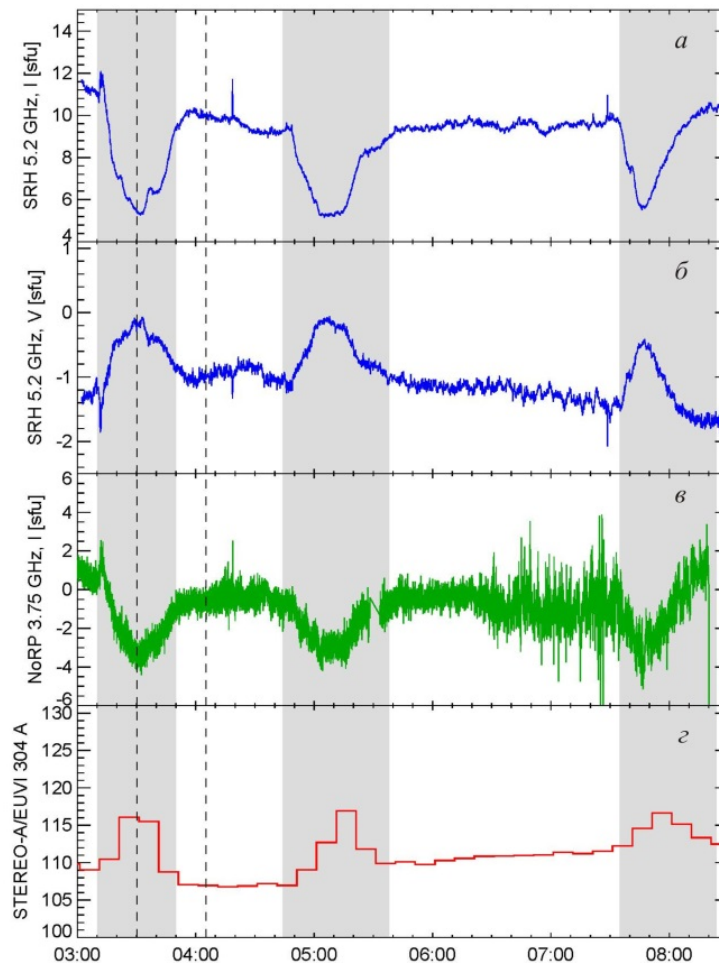


Рис. 5. Наблюдения 9 августа 2016 г. Построенные по изображениям СРГ на частоте 5.2 ГГц временные профили интенсивности (а) и поляризации (б) затенявшегося источника в сравнении с записью интегрального потока NoRP на частоте 3.75 ГГц (в) и потоком ультрафиолетового излучения в канале 304 Å для области, ограниченной рамкой на рис. 6, z. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты наблюдений изображений на рис. 4. Серые вертикальные полосы обозначают интервалы, которым соответствуют изображения на рис. 6

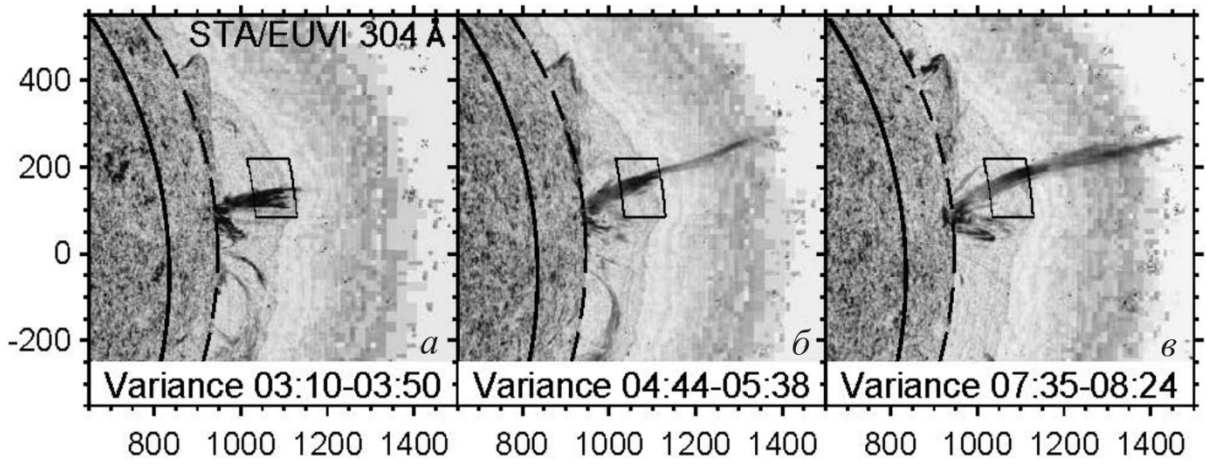


Рис. 6. Наблюдения 9 августа 2016 г. Изображения трех сердечей, выделенные дисперсионным анализом кадров STEREO-A/EUVI 304 Å в указанных интервалах. Рамка в центре обозначает область, по которой построены временные профили на рис. 5, г. Тонкая штриховая дуга обозначает солнечный лимб, видимый со стороны STEREO-A. Толстая сплошная дуга соответствует восточному лимбу, видимому с Земли. По осям указаны угловые секунды от центра солнечного диска со стороны STEREO-A

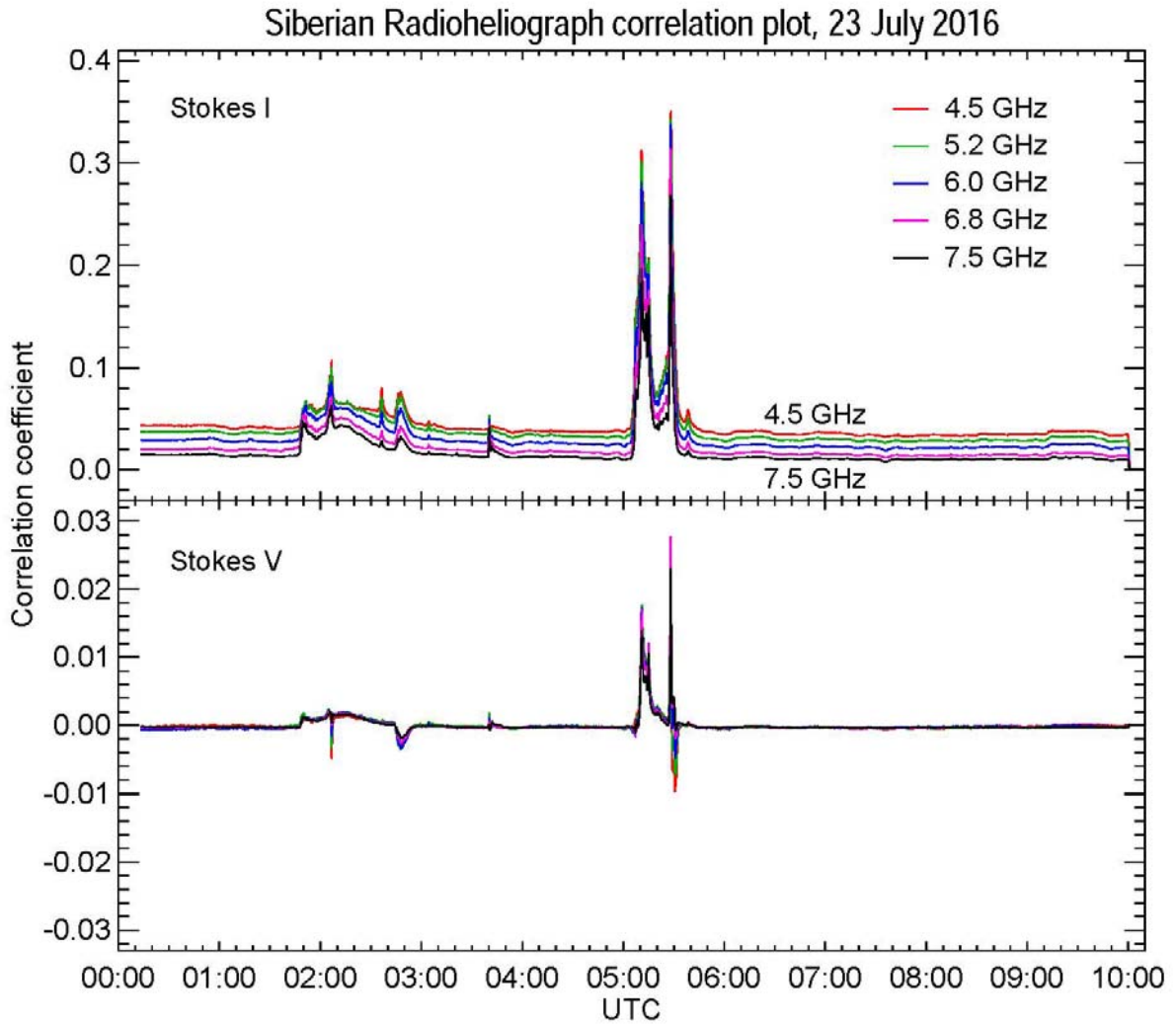


Рис. 7. Корреляционные графики с записью мощных вспышек 23 июля 2016 г.

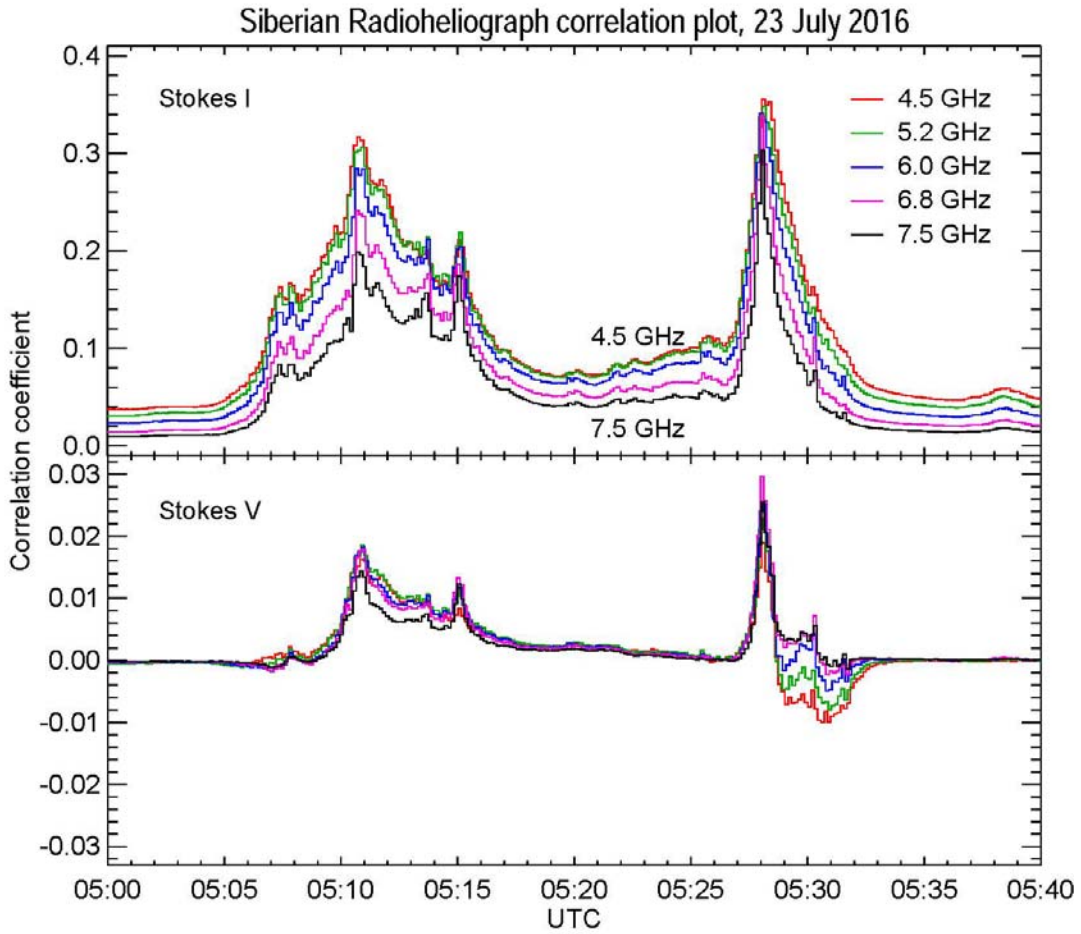


Рис. 8. Корреляционные кривые двух вспышек 23 июля 2016 г. с инверсией поляризации в полосе СРГ (05:28:30–05:30:30 UT)

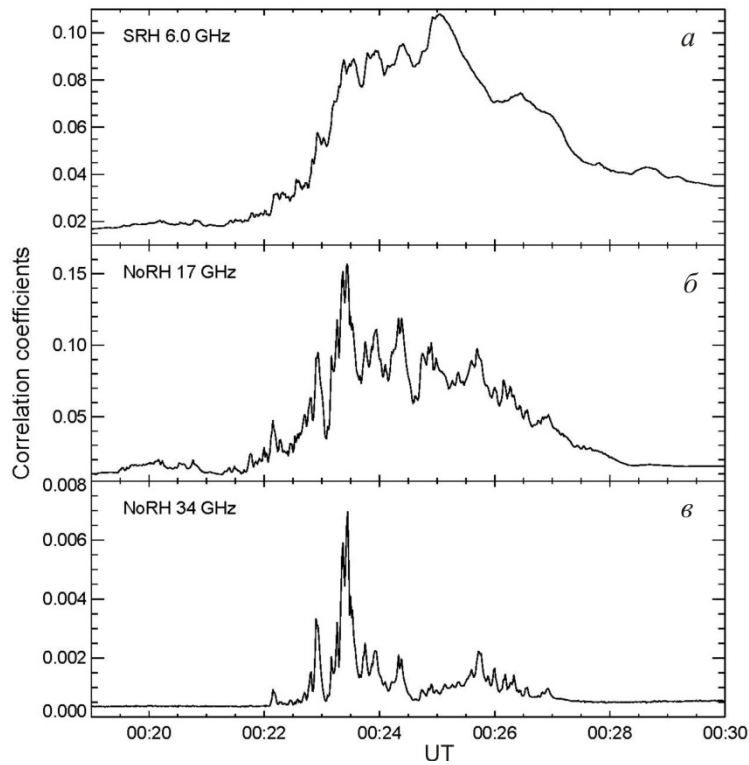


Рис. 9. Корреляционные кривые вспышки M7.6, записанные 18 апреля 2016 г. СРГ на 6 ГГц (а) и NoRH на 17 ГГц (б) и 34 ГГц (в)

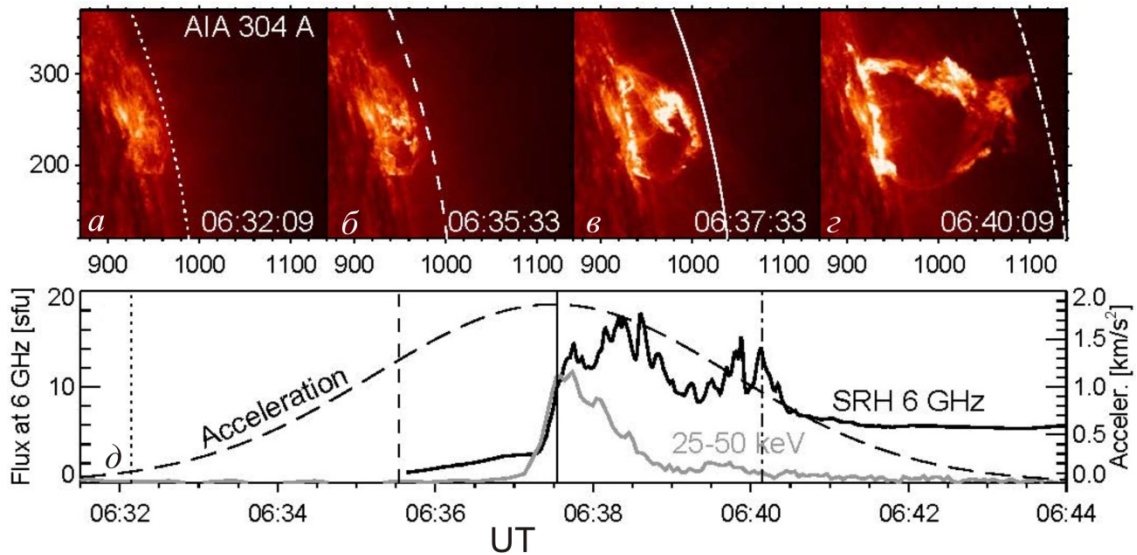


Рис. 10. Эруптивная вспышка 16 марта 2016 г. Вверху: эрупция протуберанца на изображениях SDO/AIA в канале 304 Å. По осям — угловые секунды от центра солнечного диска. Дугами обведен верхний край поднимающегося протуберанца. Внизу: временные профили микроволнового (черный — СРГ, 6 ГГц) и жесткого рентгеновского излучения (серый — Fermi, 25–50 кэВ) в сравнении с измеренным ускорением протуберанца (штриховая кривая), соответствующим дугам на кадрах *a–z*. Моменты этих кадров отмечены на нижней панели вертикальными линиями тех же стилей, что и дуги

Для сравнения на рис. 10, *д* приведены также временные профили жесткого рентгеновского излучения, зарегистрированного Fermi Gamma-Ray Burst Monitor [Meegan et al., 2009], и микроволнового всплеска, построенного по изображениям СРГ на 6.0 ГГц. Подъем протуберанца начался за несколько минут до резкого начала всплеска в жестком рентгене и микроволнах. Ускорение до высоких энергий основной массы электронов во вспышке, ответственных за всплеск в жестком рентгене и микроволнах, явно было следствием эрупции протуберанца. Такая последовательность событий типична для эруптивных вспышек [Grechnev et al., 2015, 2016].

На рис. 11 приведены временные профили вспышки в разных диапазонах излучения: в двух каналах жесткого рентгена — Fermi/GBM (*а*), в микроволнах на частоте 6 ГГц — СРГ (*б*) и в крайнем ультрафиолете — SDO/AIA 193 Å (*в*). Последний временной профиль рассчитан по скользящим (бегущим) разностным изображениям (из каждого текущего кадра вычтен наблюдавшийся за 48 с до него) в пределах масок, выделяющих яркие области над лентами шириной в картинной плоскости $\leq 4''$, т. е. высотой до 3000 км (эти области видны и на изображениях в 304 Å на рис. 10, *в, z*). Область температурной чувствительности канала 193 Å начинается с 0.2 МК ($> 2 \cdot 10^5$ К). Следовательно, временной профиль на рис. 11, *в* относится к горячим плотным областям над вспышечными лентами, длительное послесвечение которых подавлено скользящим вычитанием. Сходство временных профилей на 6 ГГц и в канале 193 Å не оставляет сомнений в общности их источников. Такого сходства нет с временными профилями в канале 193 Å для каждой из отдельных областей над лентами. Следовательно, источники микроволнового излучения были рассредоточены по всей длине лент, располагаясь, скорее всего, в нижних частях вспышечной аркады.

Сходство микроволнового всплеска с жестким рентгеном на рис. 11, *а* меньше, чем с временным профилем в канале 193 Å. Быстрый рост излучения на 6 ГГц произошел почти одновременно с жестким рентгеновским, но медленное нарастание микроволнового излучения началось раньше. Начальный участок записи на 6 ГГц менее надежен из-за неточного наведения антенн СРГ в начале события; тем не менее аналогичный рост излучения в канале 193 Å подтверждает корректность записи. Второй пик после 06:39 также обнаруживается в излучении диапазона 25–50 кэВ, хотя и слабее, чем в микроволнах, но не виден в более жестком излучении 50–98 кэВ, что указывает на более мягкий спектр электронов во втором пике. Продолжительная подложка микроволнового всплеска вызвана, вероятно, тепловым тормозным излучением плазмы во вспышечной аркаде и излучением ускоренных электронов, захваченных в ее петли. При указанных различиях между всплесками в микроволновом и жестком рентгеновском диапазонах имеется их общее сходство и соответствие отдельных структурных деталей. Скорее всего, источники жесткого рентгеновского излучения также были распределенными по длине лент, что соответствует модельным представлениям.

Комбинированный микроволновый спектр этого события на рис. 12, скомпонованный из данных спектрополяриметров интегрального потока [Zhdanov, Zandanov, 2015] и NoRP, представляет серию импульсов длительностью 5–10 с и частотами спектрального максимума < 10 ГГц. Ширина спектра этих импульсных всплесков во время второго пика (06:39:00–06:40:30 UT) не превышает 2–3 ГГц, являясь нетипично узкой для гиротронного излучения даже при мягком спектре излучающих электронов. Различия спектров микроволновых импульсов предполагают различие их источников, подтверждая вывод об их расположении в разных местах над лентами.

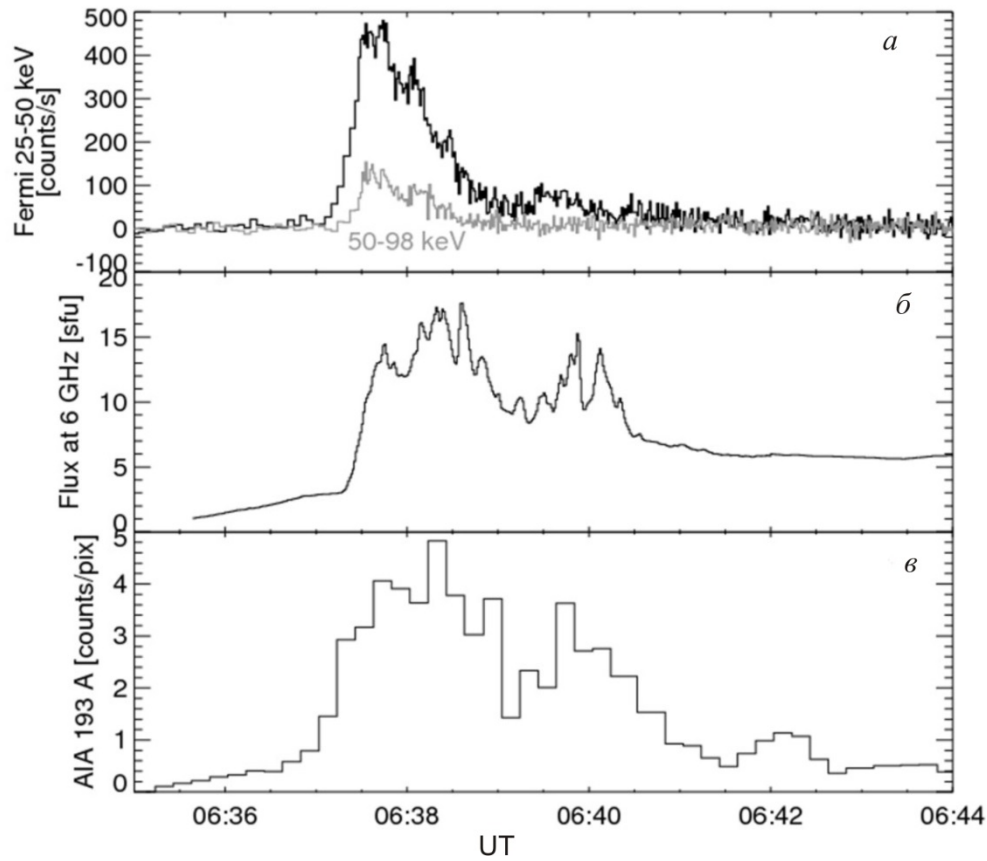


Рис. 11. Временные профили жесткого рентгеновского Fermi/GBM (а), микроволнового СРГ (б) и крайнего ультрафиолетового SDO/AIA 193 Å (в), излучения вспышки 16 марта 2016 г. Каждая точка временного профиля (в) вычислена по разности между текущим изображением SDO/AIA в канале 193 Å и изображением, наблюдавшимся на 48 с ранее в пределах ярких областей над вспышечными лентами

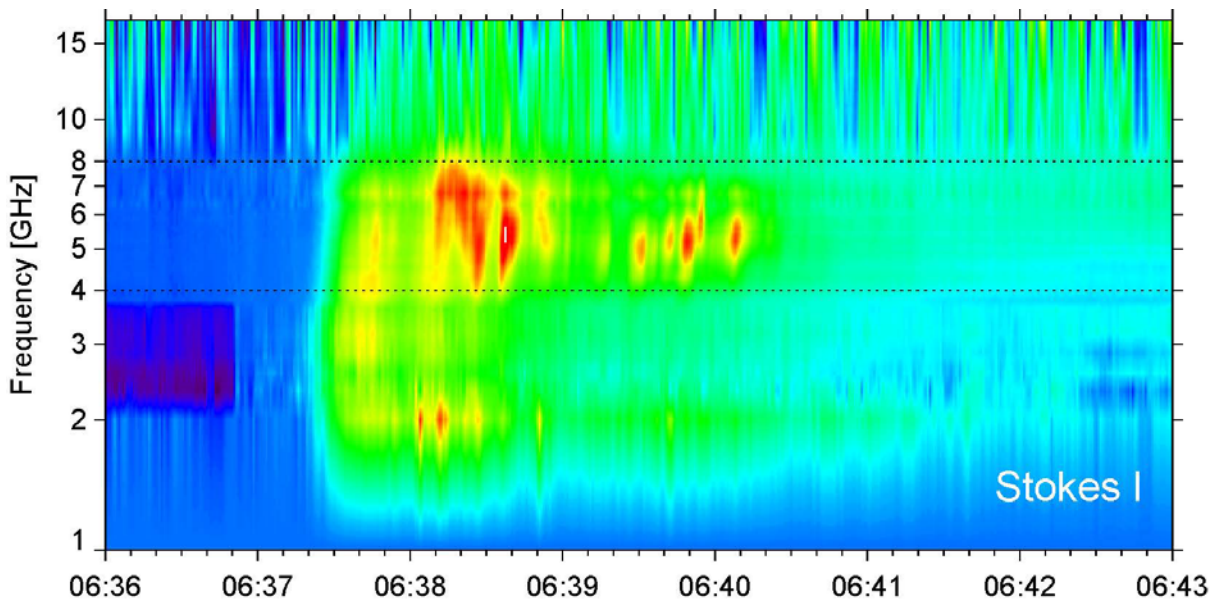


Рис. 12. Динамический спектр вспышки 16 марта 2016 г. Горизонтальными линиями обозначена полоса частот СРГ

Еще одна особенность этой вспышки — весьма скромный микроволновый поток (до 18 с.е.п.) при достаточно интенсивном всплеске в жестком рентгене. Среди причин слабости микроволнового излучения могла быть компактность его источников.

Предварительный анализ наблюдений на СРГ-48 эруптивной вспышки 16 марта 2016 г. демонстрирует,

что даже с неполной антенной решеткой, ограничивающей его пространственное разрешение, совместный анализ полученных изображений с данными спектрополяриметров и других диапазонов солнечного излучения позволяет исследовать взаимосвязь эрупции и вспышки и выявить свойства неразрешаемой вспышечной конфигурации. Наблюдения на

инструментах с ограниченными пространственным разрешением и динамическим диапазоном привели к впечатлению о преобладании нетепловых процессов в простых одно- и двухпетельных вспыхивающих конфигурациях. Эти представления трудно согласовать с наблюдениями других типов излучения (например, в крайнем ультрафиолете) и известными моделями. Соответствие в рассмотренном событии различных вспыхивающих проявлений, наблюдаемых в разных диапазонах, согласуется с моделями и выводами последних исследований [например, Grechnev et al., 2017].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения с помощью первой очереди многоволнового Сибирского радиогелиографа демонстрируют эффективность проектных решений и их практической реализации. Т-образная антенная решетка с избыточными базами позволила реализовать быстрые и эффективные алгоритмы построения изображений Солнца без привлечения дополнительных наблюдений иных космических источников. Высокая чувствительность интерферометра ($\approx 10^{-2}$ с.е.п.) в сочетании с широким динамическим диапазоном позволяет без использования аттенуаторов наблюдать компактные источники мощных солнечных всплесков. Достоинствами СРГ являются достаточно высокое для исследования многих процессов временное разрешение (до 0.84 с в одночастотном режиме), многочастотный прием с возможностью выбора сетки рабочих частот в зависимости от программы наблюдений, возможности синтеза изображений с оптимизацией требуемых параметров (например, пространственного разрешения или чувствительности), отсутствие геометрических искажений, присущих прежнему ССРТ.

СРГ позволяет синтезировать десятки тысяч изображений Солнца в день. Методы и программные средства для синтеза и калибровки изображений и их последующего анализа частично разработаны, в том числе в наших предшествовавших исследованиях. Для решения разнообразных наблюдательных и исследовательских задач необходимы их развитие и адаптация.

Следующим шагом в развитии СРГ будет дополнение решетки до 96 антенн. Пространственное разрешение СРГ-96 достигнет 15". Дополнительные антенны уже смонтированы, в том числе и на крайних антенных постах ССРТ, удаленных на 330 м от центра антенной решетки. Как показывает опыт наблюдений на ССРТ, такое разрешение позволит исследовать процессы инициации корональных выбросов массы и их распространения до высот в один–два радиуса Солнца, заполняя разрыв между наблюдениями в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах [Uralov et al., 2002, Alissandrakis et al., 2013]. Важной задачей будут являться многоволновые наблюдения активных областей с целью верификации технологий корональной магнитографии [Nita et al., 2011].

Приведенный обзор результатов первых наблюдений, относящихся лишь к немногим из широкого круга возможных задач, показывает высокий

наблюдательный потенциал нового инструмента. Предварительный анализ событий нуждается в завершении. Некоторые упомянутые наблюдательные результаты требуют осмысления. Вместе с тем, продолжающиеся наблюдения поставляют новый материал. В силу перечисленных обстоятельств приветствуется любой интерес к развитию программно-методического комплекса СРГ и анализу поставляемых им данных.

Авторы благодарны П.М. Свидскому за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Программы 7 фундаментальных исследований президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике», гранта РФФИ 15-02-01089 А, 15-02-03717 А, а также при поддержке ФАНО уникальной научной установки ССРТ в рамках проекта «Исследование сверхслабой солнечной активности в микроволновом диапазоне». Экспериментальные данные получены с использованием ССРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Кашапова Л.К. Введение в радиоастрономию Солнца. Иркутск: Изд. ИГУ, 2014. 203 с.
- Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика 2017. Т. 3, № 1. С. 17–21
- Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourakos S., Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Lesovoya N.N. Microwave and EUV observations of an erupting filament and associated flare and coronal mass ejections // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2013. V. 65, N SP1, article id. S8, 10 pp.
- Altyntsev A., Meshalkina N., Meszarosova, H., Karlicky M., Palshin V., Lesovoi S. Sources of quasi-periodic pulses in the flare of 18 August 2012 // Solar Phys. 2016. V. 291, iss. 2, P. 445–463.
- Bastian T.S., Gary D.E., White S.M., Hurford G.J. Toward a frequency-agile solar radiotelescope // 18 NSO/Sacramento Peak Summer Workshop “Synoptic Solar Physics”. Sunspot, New Mexico 8–12 September 1997. P. 563 (ASP Conference Series. 1998. V. 140).
- Bogod V.M., 2011, RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. I. New opportunities and tasks // Astrophys. Bull. 2011. V. 66, iss. 2. P. 190–204.
- Borovik V.N. Quiet Sun from multifrequency radio observations on RATAN-600 // Lecture Notes in Phys. 1994. V. 432. P. 185–190.
- Fleishman G.D., Palshin V.D., Meshalkina N.S., Lysenko L., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A Cold flare with delayed heating // Astrophys. J. 2016. V. 822, iss. 2, article id. 71. 20 p.
- Gary D.E., Nita G.M., Sane N. Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) testbed and prototype // American Astronomical Society, AAS Meeting 220, id. 204.30 2012.
- Grechnev V.V. A method to analyze imaging radio data on solar flares // Solar Phys. 2003. V. 213, iss. 1. P. 103–110.
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., Krissinel B.B., Zandanov V.G., Altyntsev A.T., Kardapolova N.N., Sergeev R.Y., Uralov A.M., Maksimov V.P., Lubyshev B.I. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations, and data // Solar Phys. 2003. V. 216, iss. 1. P. 239–272.
- Grechnev V.V., Kuz'menko I.V., Uralov A.M., Chertok M., Kochanov A.A. Microwave negative bursts as indications of reconnection between eruptive filaments and a large-scale coronal magnetic environment // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2013. V. 65, N SP1, article id. S10, 9 p.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S. Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock // *Solar Phys.* 2015. V. 290. Iss. 1. P. 129–158.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., Kuzmenko I.V., Prosovetsky D.V., Egorov Y.I., Fainshtein V.G., Kashapova L.K. A tiny eruptive filament as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave // *Solar Phys.* 2016. V. 291. Iss. 4. P. 1173–1208.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare // *Solar Phys.* 2017. V. 292. Iss. 1, article id. 3, 27 pp.

Kaltman T.I., Kochanov A.A., Myshyakov I.I., Maksimov V.P., Prosovetsky D.V., Tokhchukova S.K. Observations and modeling of the spatial distribution and microwave radiation spectrum of the active region NOAA 11734 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015. V. 55. Iss. 8. P. 1124–1130.

Kochanov A.A., Anfinogentov S.A., Prosovetsky D.V., Rudenko G.V., Grechnev V.V. Imaging of the solar atmosphere by the Siberian Solar Radio Telescope at 5.7 GHz with an enhanced dynamic range // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 2013. V. 65, N SP1, article id. S19, 12 p.

Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov V.E., Tsvetkov S.V. Magnetospheres of solar active regions inferred from spectral-polarization observations with high spatial resolution // *Astrophys. J.* 1993. V. 419. P. 398–417.

Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 17–40.

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph // *Res. Astronomy and Astrophys.* 2014. V. 14. N 7. P. 864–868.

Meegan C., Lichti G., Bhat P. N., et al. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor // *Astrophys. J.* 2009. V. 702. P. 791–804.

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. New Nobeyama Radio Heliograph // *J. Astrophys. Astron. Suppl.* 1995. V. 16. P. 437–442.

Nita G.M., Fleishman G.D., Jing, Ju, Lesovoi S.V., Bogod V.M., Yasnov L.V., Wang H., Gary D.E. Three-dimensional structure of microwave sources from solar rotation stereoscopy versus magnetic extrapolations // *Astrophys. J.* 2011. V. 737. Iss. 2, article id. 82, 12 p.

Nita G.M., Gary D.E., Lee J. Statistical study of two years of solar flare radio spectra obtained with the Owens Valley Solar Array // *Astrophys. J.* 2004. V. 605. Iss. 1. P. 528–545.

Smolkov G.I., Pistolorkos A.A., Treskov T.A., Krissinel B.B., Putilov V.A. The Siberian Solar Radio-Telescope — parameters and principle of operation, objectives and results of first observations of spatio-temporal properties of development of active regions and flares // *Astrophys. Space Sci.* 1986. V. 119. N. 1. P. 1–4.

Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: Observations and model // *Solar Phys.* 2002. V. 208. Iss. 1. P. 69–90.

Wang Z., Gary D.E., Fleishman G.D., White S.M. Coronal magnetography of a simulated solar active region from microwave imaging spectropolarimetry // *Astrophys. J.* 2015. V. 805. Iss. 2, article id. 93, 13 p.

Yan Y., Zhang J., Wang W., Liu F., Chen Z., Ji G. The Chinese Spectral Radioheliograph – CSRH // *Earth, Moon, and Planets.* 2009. V. 104. Iss. 1–4. P. 97–100.

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary broadband microwave spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 287–294.

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun // *Astrophys. J. Part I* (ISSN 0004-637X). 1991. V. 370. P. 779–783.

<http://badary.iszf.irk.ru> (дата обращения 10 декабря 2016).
<ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48> (дата обращения 10 декабря 2016).

<ftp://badary.iszf.irk.ru> (дата обращения 10 декабря 2016).
<http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (дата обращения 10 декабря 2016).

REFERENCES

Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourakos S., Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Lesovoya N.N. Microwave and EUV Observations of an Erupting Filament and Associated Flare and Coronal Mass Ejections. *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 2013, vol. 65, no. SP1, article id. S8, 10 p.

Altyntsev A.T., Kashapova L.K. *Vvedenie v radioastronomiyu Solntsa* [Introduction to Solar Radio Astronomy]. Irkutsk, IGU Publ., 2014. 203 p. (In Russian).

Altyntsev A., Meshalkina N., Meszarosova, H., Karlicky M., Palshin V., Lesovoi S. Sources of quasi-periodic pulses in the flare of 18 August 2012. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 2, pp. 445–463.

Bastian T.S., Gary D.E., White S.M., Hurford G.J. Toward a frequency-agile solar radiotelescope. *18 NSO/Sacramento Peak Summer Workshop “Synoptic Solar Physics”*. Sunspot, New Mexico 8–12 September 1997, p. 563 (ASP Conference Series. 1998, vol. 140).

Bogod V.M., 2011, RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. I. New opportunities and tasks. *Astrophys. Bull.* 2011, vol. 66, iss. 2, pp. 190–204.

Borovik V.N. Quiet Sun from multifrequency radio observations on RATAN-600. *Lecture Notes in Phys.* 1994, vol. 432, pp. 185–190.

Fleishman G.D., Pal’shin V.D., Meshalkina N.S., Lysenko L., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A cold flare with delayed heating. *Astrophys. J.* 2016, vol. 822, iss. 2, article id. 71, 20 p.

Gary D.E., Nita G.M., Sane N. Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) testbed and prototype. *American Astronomical Society, AAS Meeting 220*, id. 204.30 2012.

Grechnev V.V. A method to analyze imaging radio data on solar flares. *Solar Phys.* 2003, vol. 213, iss. 1, pp. 103–110.

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., Krissinel B.B., Zandanov V.G., Altyntsev A.T., Kardapolova N.N., Sergeev R.Y., Uralov A.M., Maksimov V.P., Lubyshev B.I. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations, and data. *Solar Phys.* 2003, vol. 216, iss. 1, pp. 239–272.

Grechnev V.V., Kuz’menko I.V., Uralov A.M., Chertok M., Kochanov A.A. Microwave negative bursts as indications of reconnection between eruptive filaments and a large-scale coronal magnetic environment. *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 2013, vol. 65, no. SP1, article id. S10, 9 p.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S. Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 1, pp. 129–158.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., Kuzmenko I.V., Prosovetsky D.V., Egorov Y.I., Fainshtein V.G., Kashapova L.K. A Tiny eruptive filament as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 4, pp. 1173–1208.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, iss. 1, article id. 3, 27 p.

Kaltman T.I., Kochanov A.A., Myshyakov I.I., Maksimov V.P., Prosovetsky D.V., Tokhchukova S.K. Observations and modeling of the spatial distribution and microwave radiation spectrum of the active region NOAA 11734. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, iss. 8, pp. 1124–1130.

Kochanov A.A., Anfinogentov S.A., Prosovetsky D.V., Rudenko G.V., Grechnev V.V. Imaging of the solar atmosphere by the Siberian Solar Radio Telescope at 5.7 GHz with an enhanced dynamic range. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2013, vol. 65, no. SP1, article id. S19, 12 p.

Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov V.E., Tsvetkov S.V. Magnetospheres of solar active regions inferred from spectral-polarization observations with high spatial resolution. *Astrophys. J.* 1993, vol. 419, pp. 398–417.

Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, iss. 1, pp. 17–40.

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph. *Res. Astron. Astrophys.* 2014, vol. 14, no. 7, pp. 864–868.

Lesovoi S.V., Kobets V.S. Correlation curves of the Siberian Radioheliograph. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Phys.]. 2017, vol. 3, no. 1, pp. 17–21. (In Russian).

Meehan C., Lichti G., Bhat P.N., Bissaldi E., Briggs M.S., Connaughton V., Diehl R., Fishman G., Greiner J., Hoover A.S., van der Horst A.J., von Kienlin A., Kippen R.M., Kouveliotou C., McBreen S., Paciesas W.S., Preece R., Steinle H., Wallace M.S., Wilson R.B., Wilson-Hodge C. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *Astrophys. J.* 2009, vol. 702, no. 1, pp. 791–804.

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. New Nobeyama Radio Heliograph. *J. Astrophys. Astron. Suppl.* 1995, vol. 16, pp. 437–442.

Nita G.M., Fleishman G.D., Jing, Ju, Lesovoi S.V., Bogod V.M., Yasnov L.V., Wang H., Gary D.E. Three-dimensional structure of microwave sources from solar rotation stereoscopy versus magnetic extrapolations. *Astrophys. J.* 2011, vol. 737, iss. 2, article id. 82, 12 p.

Nita G.M., Gary D.E., Lee J. Statistical study of two years of solar flare radio spectra obtained with the Owens Valley Solar Array. *Astrophys. J.* 2004, vol. 605, iss. 1, pp. 528–545.

Smolkov G.Ia., Pistolkors A.A., Treskov T.A., Krissinel B.B., Putilov V.A. The Siberian Solar Radio-Telescope — Parameters and principle of operation, objectives and results of first observations of spatio-temporal properties of development of active regions and flares. *Astrophys. Space Sci.* 1986, vol. 119, no. 1, pp. 1–4.

Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: Observations and model. *Solar Phys.* 2002, vol. 208, iss. 1, pp. 69–90.

Wang Z., Gary D.E., Fleishman G.D., White S.M. Coronal magnetography of a simulated solar active region from microwave imaging spectropolarimetry. *Astrophys. J.* 2015, vol. 805, iss. 2, article id. 93, 13 p.

Yan Y., Zhang J., Wang W., Liu F., Chen Z., Ji G. The Chinese Spectral Radioheliograph — CSRH. *Earth, Moon, and Planets*. 2009, vol. 104, iss. 1–4, pp. 97–100.

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary broadband microwave spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, pp. 287–294.

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun. *Astrophys. J.* Part 1 (ISSN 0004-637X). 1991, vol. 370, pp. 779–783.

<http://badary.iszf.irk.ru> (accessed December 10, 2016)

<ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48> (accessed December 10, 2016).

<ftp://badary.iszf.irk.ru> (accessed December 10, 2016).

<http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (accessed December 10, 2016).