

Сибирский Радиогелиограф: первые результаты

Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А., Гречнев В.В., Губин А.В., Жданов Д.А.,
Иванов Е.Ф., Уралов А.М., Кашапова Л.К., Кузнецов А.А., Мешалкина Н.С., Сыч Р.А.
(Дата: 20.01.2016)

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 позволяет исследовать процессы солнечной активности по характеристикам их микроволнового излучения, включая ранее не регистрируемые сверхслабые события.

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 контроль солнечной активности внеатмосферными космическими технологиями.

Радиотелескопы расположены в Радиоастрофизической обсерватории (РАО) в урочище Бадары в Бурятской республике, в 25 км западнее поселка Тунка. 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 создаётся многоволновый Сибирский Радио Гелиограф (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 [BVMS, Zhdanov and 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 (т. наз. индекс 10.7) является наиболее объективной оценкой текущего уровня солнечной активности и ее изменчивости на протяжении нескольких солнечных циклов. Индекс 10.7 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 принимаемый 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 определяются динамикой конверсии энергии магнитного поля 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 недостаточна для их выделения на фоне излучения фо-



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

тосферы. 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., напр., 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, 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 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 размеру, для наблюдений эволюции структуры активных областей и вспышечных источников необходимо создание инструментов с 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 её 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,

то 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 году [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 [СРГ, 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 трёх 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, получающим 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 даёт уникальный материал для понимания различных солнечных процессов, их взаимосвязи и влияния на околоземную среду [см., напр., Алтынцев и Кашапова, 2014]. Современное состояние цифровой электроники и вычислительной техники позволяет создавать многоэлементные радиоинтерферометры, производящие с высокой скоростью 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 GHz). В настоящее время решаются вопросы с фазовой калибровкой, 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 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

ССРТ, на базе которого создаётся 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 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 минуты.

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 приёма 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 приёма около 2 с. Максимальная база составляет 107.4 м, пространственное разрешение достигает 70" на 8 ГГц. Принимаются обе круговые поляризации излучения, а чувствительность по компактному источнику достигает 10^{-4} от полного потока Солнца [Лесовой и Кобец, 2017].

Количество принимаемых частотных каналов можно менять в зависимости от задачи наблюдений. В наблюдениях квазистационарных источников, таких,

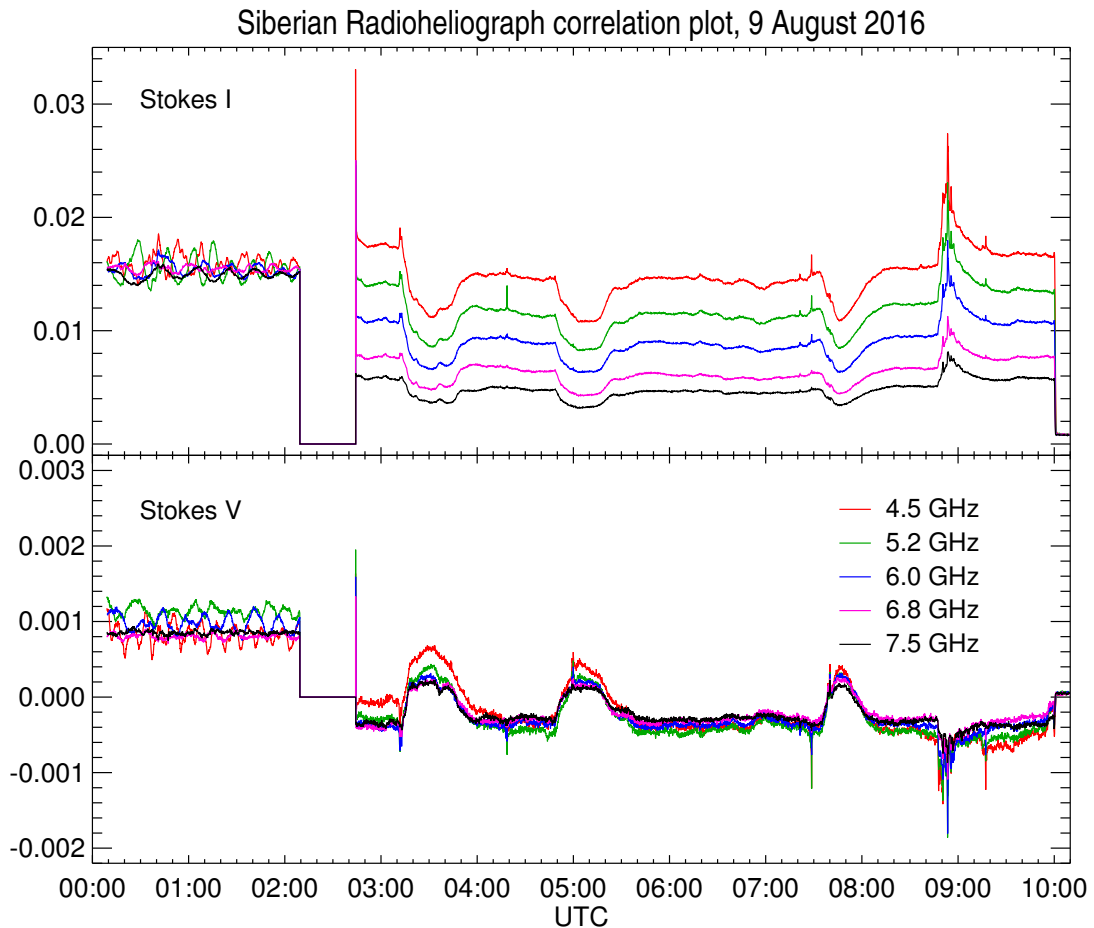


Рис. 2: Корреляционные кривые 9 августа 2016 г. с тремя отрицательными всплесками и вспышкой C2.5 в 08:55.

например, как пятенные источники, список сканируемых частот может составлять несколько сотен для достижения требуемого спектрального разрешения. При исследовании всплывающих 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 по адресу <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 минуты. Ежедневные карты в интенсивности и круговой поляризации, полученные вблизи местного полудня, доступны по адресу <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 кросс-корреляций всех пар антенн. Методы расчета корреляционных кривых и их связь с характеристиками излучения Солнца описаны в работе [Лесовой и Кобец, 2017]. Изменения на корреляционных кривых связаны с вариациями как яркости источников, так и их структуры. Корреляционные кривые приводятся в реальном времени по адресу <http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>. Пример корреляционной кривой 9 августа 2016 г. на Рис. 2 интересен наличием трёх отрицательных всплесков и последующей вспышки рентгеновского класса C2.5 в активной области 12574 (N04 E59). В начале этого дня на СРГ проводились регламентные работы, и наблюдения начались в 02:45 UT.

На Рис. 3 представлен пример набора “сырых”

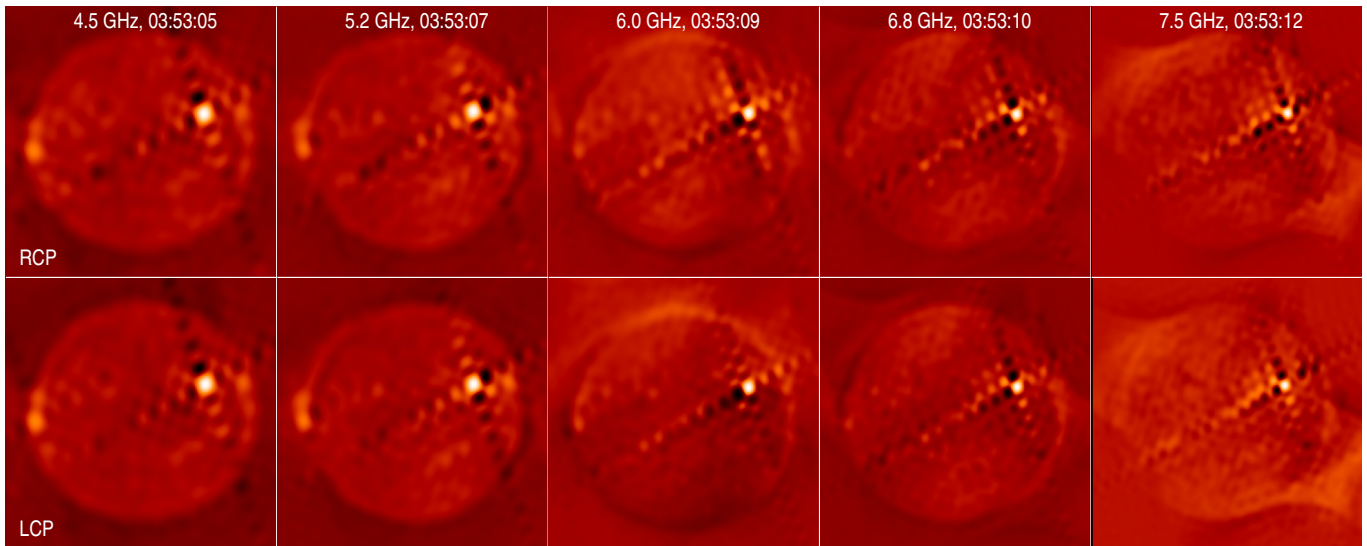


Рис. 3: Изображения диска Солнца на пяти частотах 9 июня 2016 г. в правой (RCP) и левой (LCP) круговой поляризации.

изображений Солнца на пяти частотах в правой и левой поляризации, полученных без использования процедур "чистки" изображений от вклада боковых лепестков интерферометра. Яркий источник на северо-западе является откликом на активную область NOAA 12571. Боковые лепестки выглядят как узкие "зебра" – полосы. 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 они определяются сверткой с диаграммой направленности интерферометра, которая уменьшается с ростом частоты.

Для калибровки изображений в яркостных температурах усовершенствована методика, используемая на NoRH и SSRT. 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; Borovik, 1994]. В частности, на указанных выше пяти частотах приняты значения 18.7, 17.1, 15.4, 14.3, и 13.5 тысяч градусов. Яркостные температуры изображений компактных источников могут быть ниже истинных, если реальные размеры источников меньше диаграммы направленности SRG-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 трёх отрицательных всплесков за один день 9 августа 2016 г. беспрецедентно (Рис. 2).

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

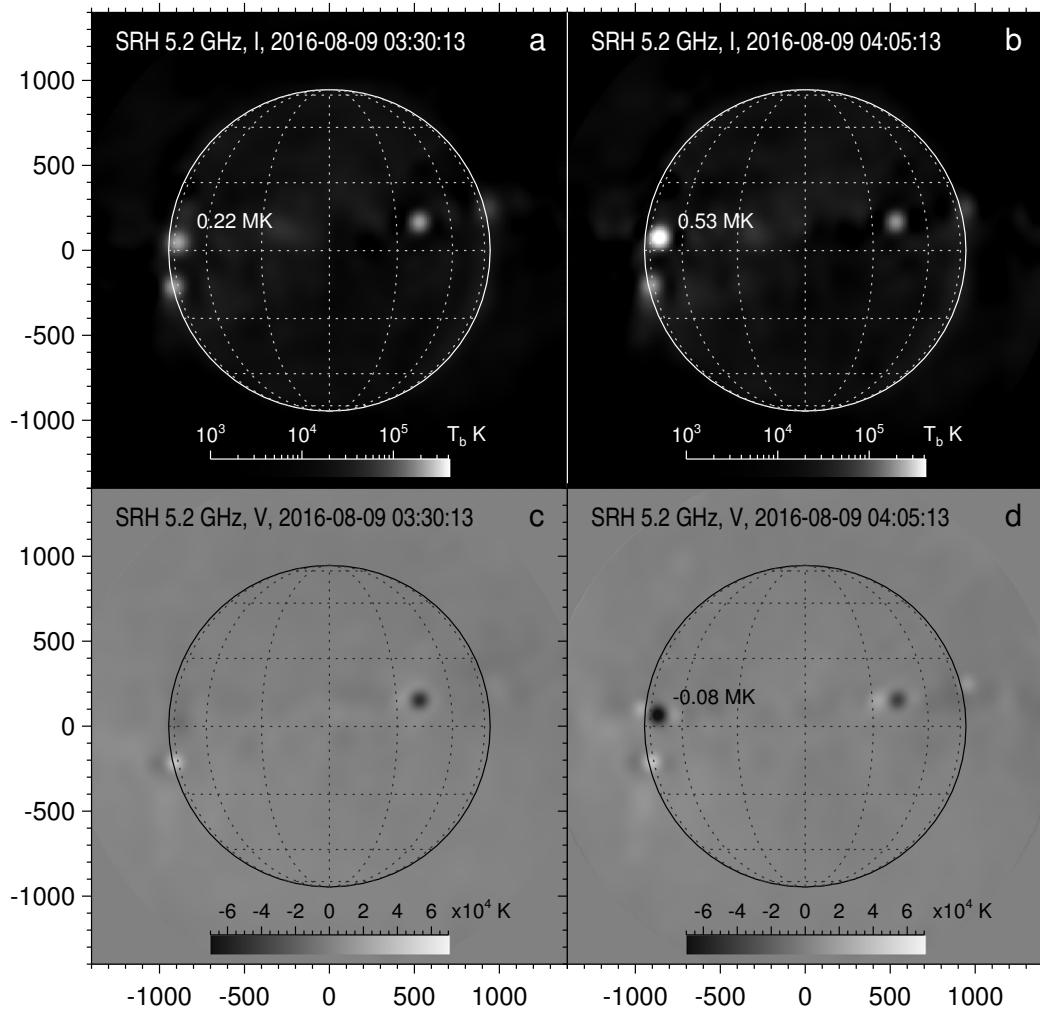


Рис. 4: Радиоизображения Солнца, полученные СРГ (SRH – Siberian Radioheliograph) на 5.2 ГГц в интенсивности и поляризации (после чистки) во время первого отрицательного всплеска (слева) и после него (справа). Отрицательный всплеск связан с затенением северного источника у восточного лимба.

нием 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 радиополяриметрами Нобейма (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·Гц)) на частоте 5.2 ГГц, поляризация смещалась в сторону положительных значений, что соответствует затенению левополяризованного источника (Рис. 4с, d).

Корональных выбросов массы в связи с отрицательными всплесками не зарегистрировано, а наблюдений Солнца на SDO/AIA в этот день не было. Поднимающиеся струи вещества (сёрджи) удалось обнаружить

на изображениях в ультрафиолетовом канале 304 Å космической обсерватории STEREO-A, располагавшейся на орбите Земли восточнее её на 152°. Изображения, приведённые 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. 5d. Появлению отрицательных всплесков однозначно соответствуют сёрджи, экранировавшие микроволновый источник. Дальнейший анализ этих отрицательных всплесков позволит оценить параметры сёрджей.

Наряду с высокой чувствительностью регистрирующая система СРГ обладает достаточно широким динамическим диапазоном для наблюдений микроволнового излучения всплесков без использования аттенюаторов. На Рис. 7 показаны корреляционные кри-

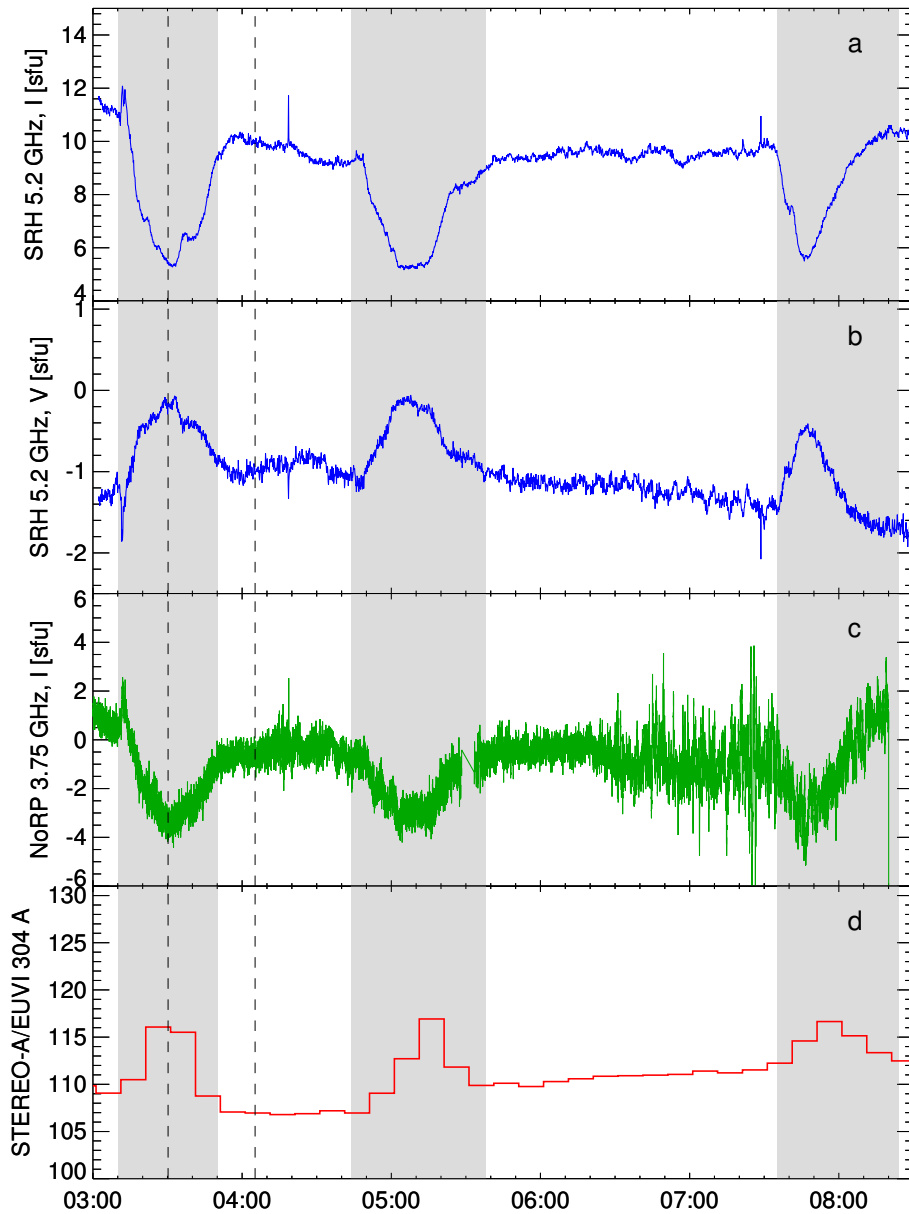


Рис. 5: 9 августа 2016 г. Построенные по изображениям СРГ на частоте 5.2 ГГц временные профили интенсивности (а) и поляризации (b) затенявшегося источника в сравнении с записью интегрального потока NoRP на частоте 3.75 ГГц (c) и потоком ультрафиолетового излучения на 304 Å в области, ограниченной рамкой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

вые с тремя мощными вспышками М-класса: М5.0 (02:11), М7.6 (05:16) и М5.5 (05:31), 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 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 М7.6 18 апреля 2016 г. При общем согласии данных СРГ (Рис. 9а) и Радиогелиографа Нобеля (NoRH, Рис. 9b, c), 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 приёма СРГ 4–8 ГГц не охватывает весь спектр гиротронного излучения мощных солнечных вспышек, который может

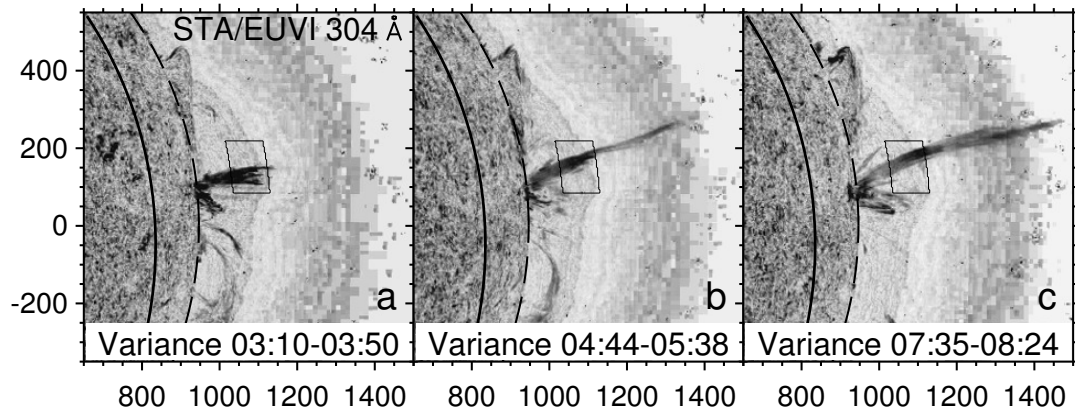


Рис. 6: 9 августа 2016 г. Изображения трех сёрджей, выделенные дисперсионным анализом кадров STEREO-A/EUVI 304 Å в указанных интервалах. Рамка в центре обозначает область, по которой построены временные профили на Рис. 5d. Тонкая пунктирная дуга обозначает солнечный лимб, видимый со стороны STEREO-A.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

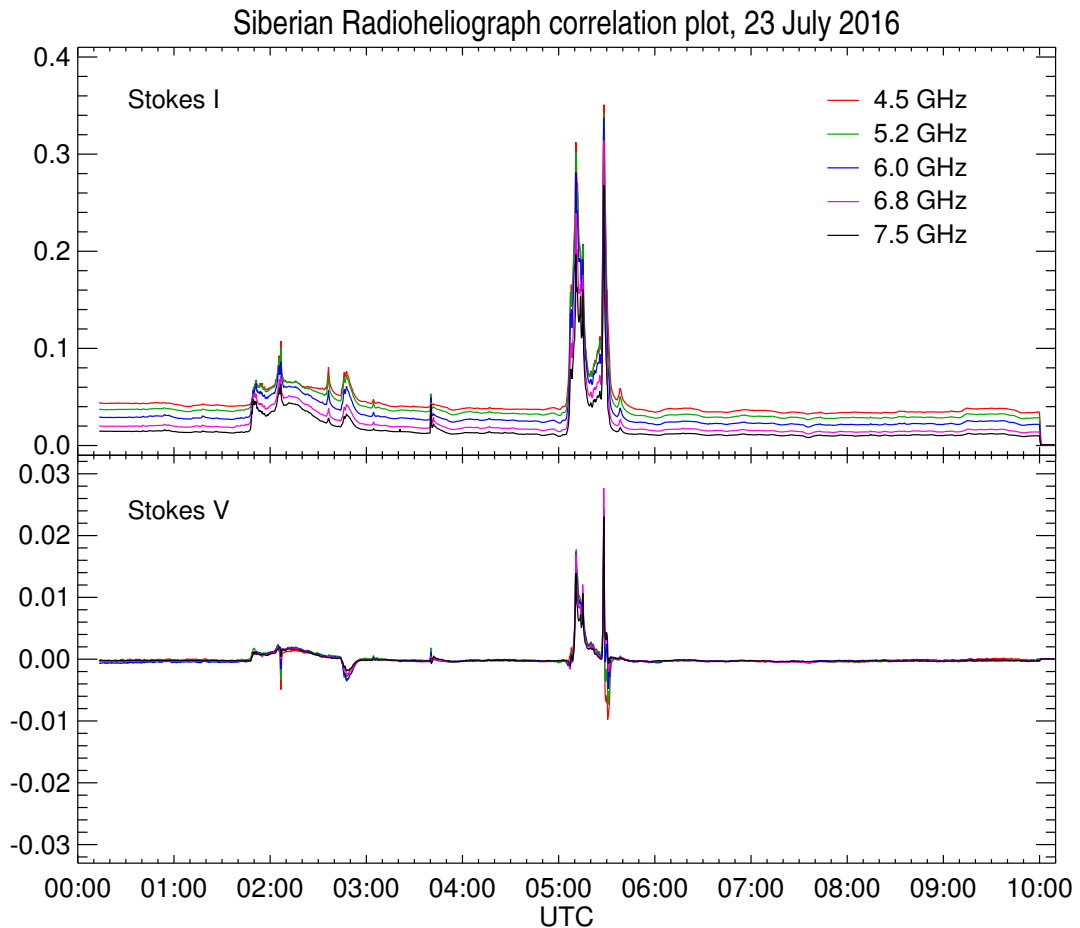


Рис. 7: Корреляционные графики с записью мощных вспышек 23 июля 2016 г.

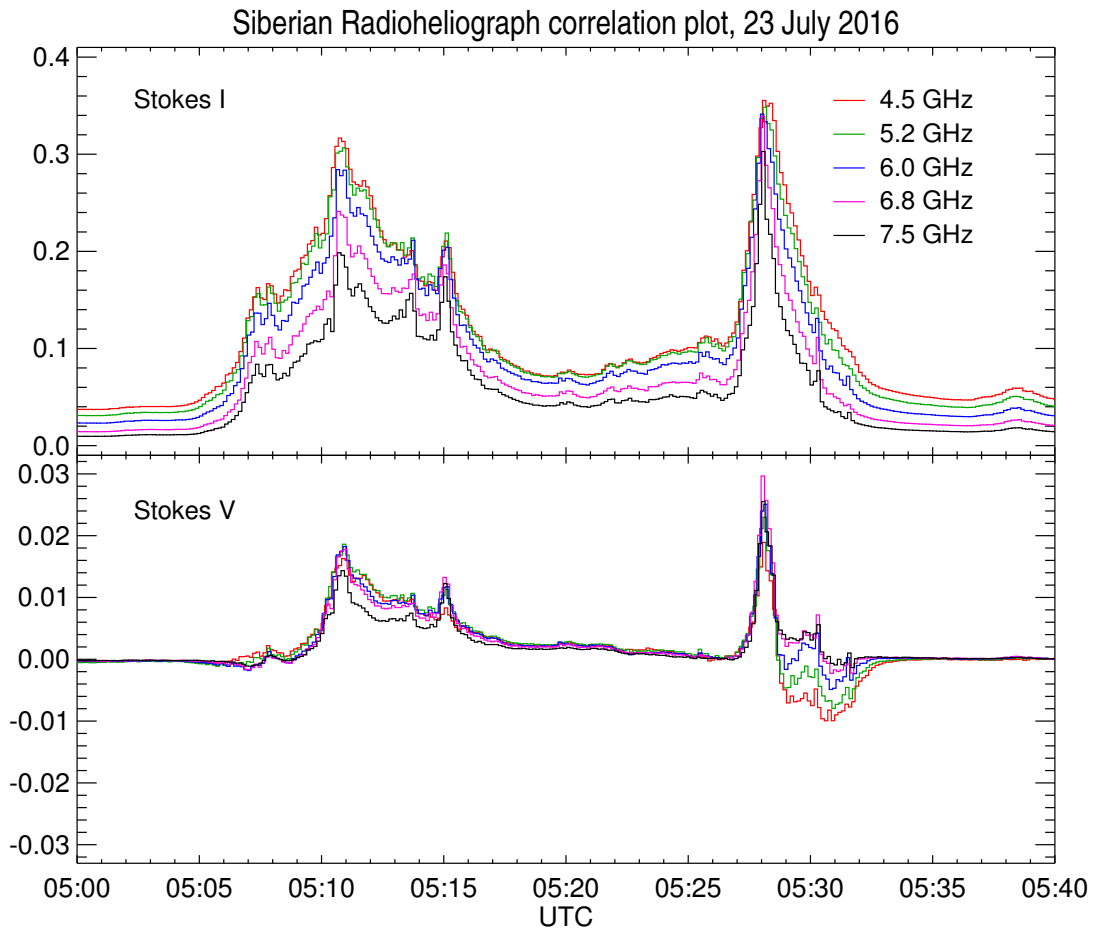


Рис. 8: Корреляционные кривые двух вспышек 23 июля 2016 г. с инверсией поляризации в полосе СРГ (05:28:30–05:30:30).

простираются до нескольких десятков ГГц. Тем не менее, изображения, полученные СРГ, позволяют выделить важные вспышечные структуры – например, обнаружить высокие вспышечные петли, невидимые на высоких частотах [Altyntsev 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 с данными других диапазонов солнечного излучения. Пример представляет 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. СРГ наблюдал 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. 10a–d обведён верхний край поднимающегося протуберанца, а

на Рис. 10е пунктиром показана аппроксимация его ускорения, достигавшего 1.8 км/с^2 . Для сравнения на Рис. 10е также приведены временные профили жёсткого рентгеновского излучения, зарегистрированного Fermi Gamma-Ray Burst Monitor [Meegan et al., 2009], и микроволнового всплеска, построенного по изображениям СРГ на 6.0 ГГц. Подъём протуберанца начался за несколько минут до резкого начала всплеска в жёстком рентгене и микроволнах. Ускорение до высоких энергий основной массы электронов во вспышке, ответственных за всплеск в жёстком 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 жёсткого рентгена – Fermi/GBM (а), в микроволнах на частоте 6 ГГц – СРГ (b) и в крайнем ультрафиолете – SDO/AIA 193 Å (с). Последний временной профиль вычислен по скользящим (“бегущим”) разностным изображениям (из каждого текущего кадра вычтен наблюдавшийся за 48 с до него) в пределах масок, выделяющих яркие области над лента-

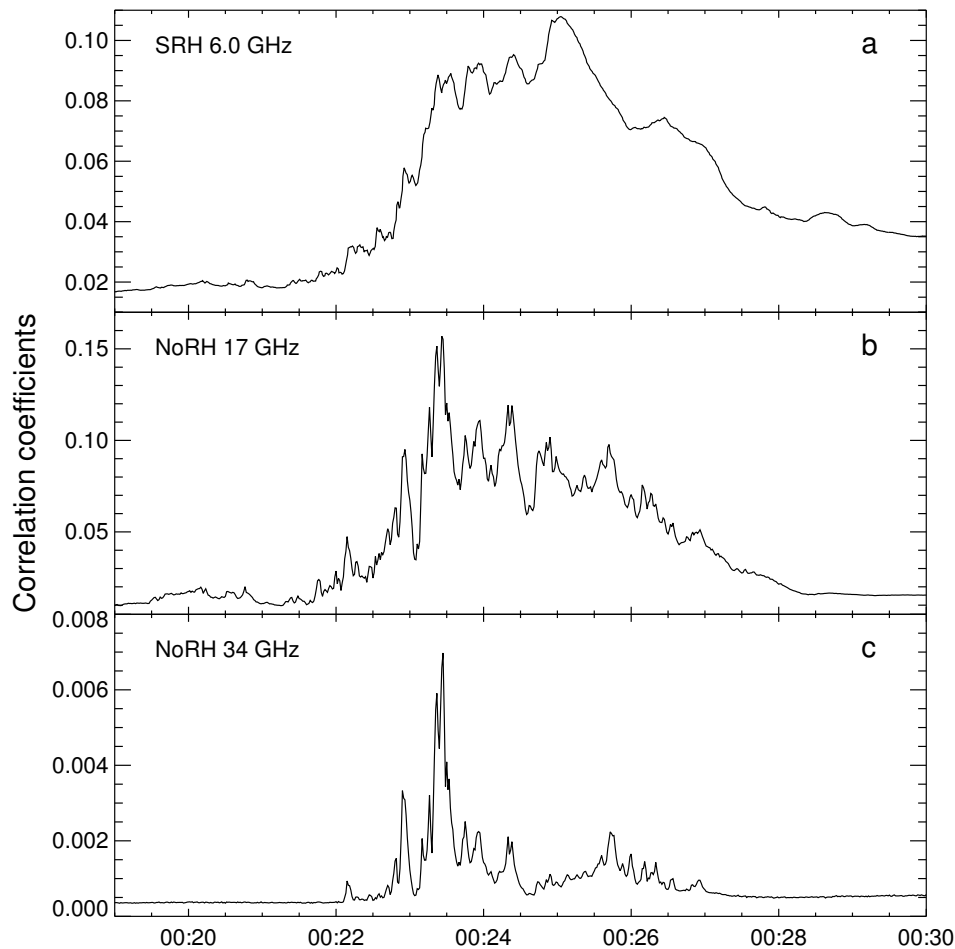


Рис. 9: Корреляционные кривые вспышки M7.6, записанные 18 апреля 2016 г. СРГ на 6 ГГц (a) и NoRH на 17 ГГц (b) и 34 ГГц (c).

ми шириной в картинной плоскости $\leq 4''$, т.е. высотой до 3000 км (эти области видны и на изображениях в 304 \AA на Рис. 10c, d). Область температурной чувствительности канала 193 \AA начинается с 0.2 MK ($> 2 \cdot 10^5 \text{ K}$). Следовательно, временной профиль на Рис. 11c относится к горячим плотным областям над вспышечными лентами, длительное послесвечение которых подавлено скользящим вычитанием. Сходство временных профилей на 6 ГГц и в 193 \AA не оставляет сомнений в общности их источников. Такого сходства нет с временными профилями в 193 \AA 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 жёстким рентгеном на Рис. 11a меньше, чем с временным профилем в 193 \AA . Быстрый рост излучения на 6 ГГц произошёл почти одновременно с жёстким рентгеновским, но медленное нарастание микроволнового излучения началось раньше. Начальный участок записи на 6 ГГц менее надёжен из-за неточного наведения

антенн СРГ в начале события; тем не менее, аналогичный рост излучения в 193 \AA подтверждает её корректность. Второй пик после 06:39 также обнаруживается в излучении диапазона 25–50 кэВ, хотя и слабее, чем в микроволнах, но не виден в более жёстком 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 её петли. При указанных различиях между всплесками в микроволновом и жёстком рентгеновском диапазонах, имеется их общее сходство и соответствие отдельных структурных деталей. Скорее всего, источники жёсткого рентгеновского излучения также были распределёнными по длине лент, что соответствует модельным представлениям.

Комбинированный микроволновый спектр этого события на Рис. 12, скомпонованный из данных спектрополяриметров интегрального потока [Zhdanov and Zandanov, 2015] и NoRP, представляет серию импульсов длительностью 5–10 с и частотами спектрально-

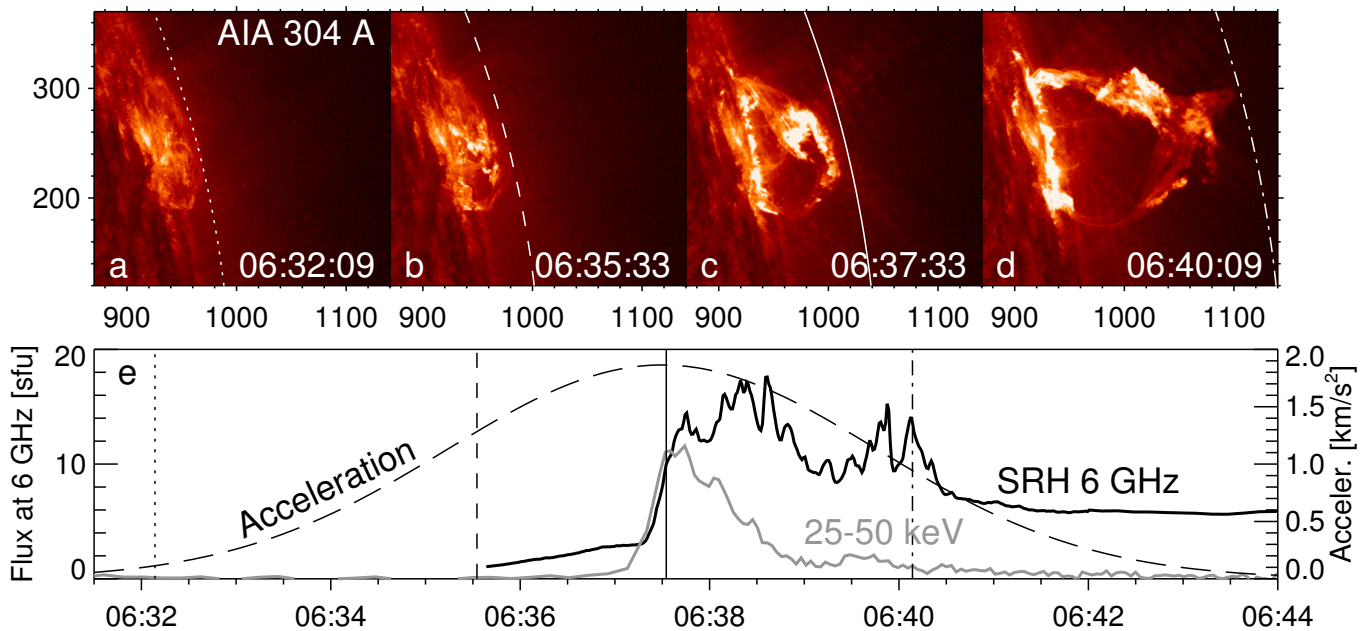


Рис. 10: Эруптивная вспышка 16 марта 2016 г. Вверху: эрупция протуберанца на изображениях SDO/AIA в канале 304 Å. По осям – угловые секунды от центра солнечного диска. Дугами обведён верхний край поднимающегося протуберанца. Внизу: временные профили микроволнового (черный – SRG, 6 ГГц) и жесткого рентгеновского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

го максимума < 10 ГГц. Ширина спектра этих импульсных всплесков во время второго пика (06:39:00–06:40:30) не превышает 2–3 ГГц, являясь нетипично узкой для гиротропного 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.

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

Предварительный анализ наблюдений на SRG-48 эруптивной вспышки 16 марта 2016 г. демонстрирует, что даже с неполной антенной решёткой, 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 вспышечных конфигурациях. Эти представления трудно согласовать с наблюдениями других типов излучения (напр., в крайнем ультрафиолете) и известными моделями. Соответствие в рассмотренном событии различных вспышечных прояв-

лений, наблюдаемых в разных диапазонах, согласуется с моделями и выводами последних исследований [напр. 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 SRG являются достаточно высокое для исследования многих процессов временное разрешение (до 0.84 с в одночастотном режиме), многочастотный приём с возможностью выбора сетки рабочих частот в зависимости от программы наблюдений, возможности синтеза изображений с оптимизацией требуемых параметров (напр., пространственного разрешения или чувствительности), отсутствие геометрических искажений, присущих преждему ССРТ.

SRG позволяет синтезировать десятки тысяч изображений Солнца в день. Методы и программные

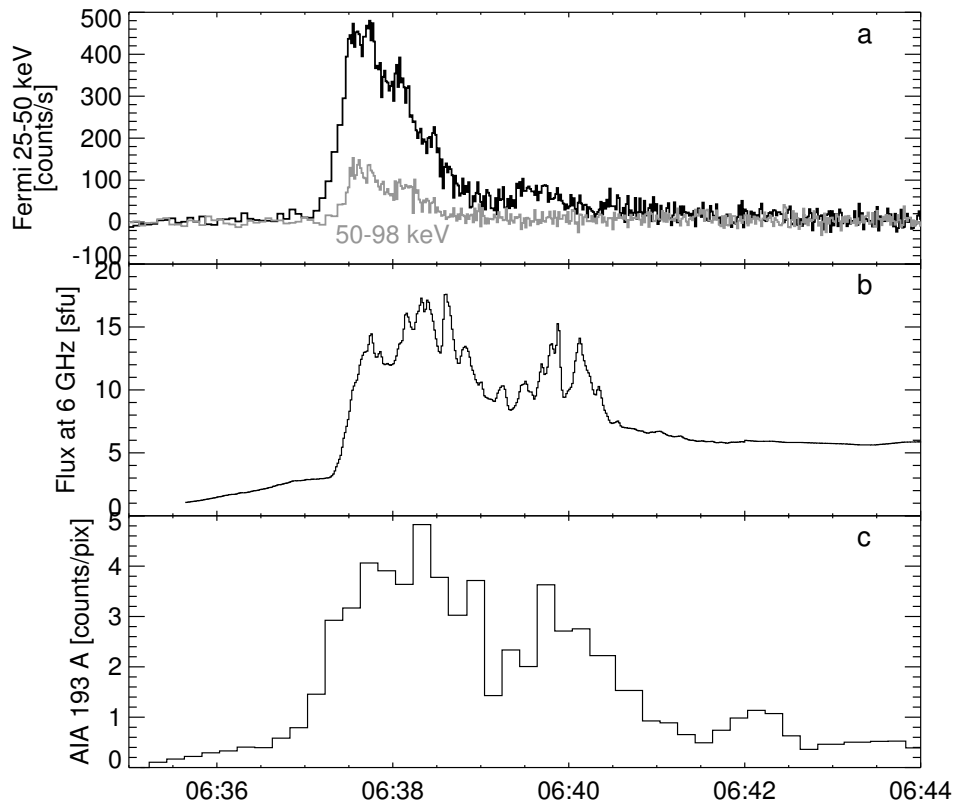


Рис. 11: Временные профили жесткого рентгеновского (a, Fermi/GBM), микроволнового (b, СРГ) и крайнего ультрафиолетового (c, SDO/AIA 193 Å) излучения вспышки 16 марта 2016 г. Каждая точка временного профиля (c) вычислена по разности текущего изображения SDO/AIA в канале 193 Å с наблюдавшимся на 48 с ранее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

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-ти антенн. Пространственное разрешение СРГ-96 достигнет $15''$. Дополнительные антенны уже смонтированы, в том числе и на крайних антенных постах ССРТ, удалённых 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].

Приведённый 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.

Алтынцев, А. Т., Кашапова, Л. К., 2014, Введение в радиоастрономию Солнца. Монография, Изд. ИГУ, Иркутск, 203 с.

Лесовой, С. В., Кобец, В. С., 2017, Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа, Солнечно-земная физика (в печати)

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

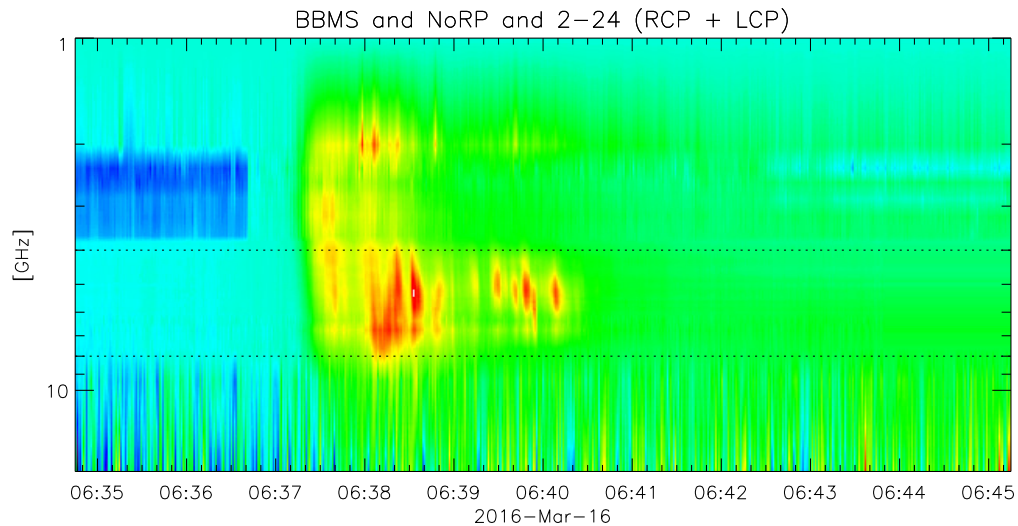


Рис. 12: Динамический спектр вспышки 16 марта 2016 г. Горизонтальными линиями обозначена полоса частот СРГ.

Altyntsev, A., Meshalkina, N., Mészárosová, H., Karlický, M., Palshin, V., Lesovoi, S., 2016, Sources of Quasi-periodic Pulses in the Flare of 18 August 2012, *Solar Physics*, Vol. 291, Issue 2, pp. 445–463

Bastian, T. S., Gary, D. E., White, S. M., Hurford, G. J., 1998, Toward a Frequency-Agile Solar Radiotelescope, *Synoptic Solar Physics – 18th NSO/Sacramento Peak Summer Workshop held at Sunspot; New Mexico 8-12 September 1997. ASP Conference Series; Vol. 140; ed. by K. S. Balasubramaniam; Jack Harvey; and D. Rabin*, p. 563

Bogod, V. M., 2011, RATAN-600 radio telescope in the 24th solar-activity cycle. I. New opportunities and tasks, *Astrophysical Bulletin*, v. 66, Issue 2, pp. 190–204

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

Fleishman, G. D., Pal'shin, V. D., Meshalkina, N. S., Lysenko, A. L., Kashapova, L. K., Altyntsev, A. T., 2016, A Cold Flare with Delayed Heating, *Astrophysical Journal*, Volume 822, Issue 2, article id. 71, 20 pp.

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

Grechnev, V.V., 2003, A method to analyze imaging radio data on solar flares, *Solar Physics*, Vol. 213, Issue 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., 2003, The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data, *Solar Physics*, Vol. 216, Issue 1, pp. 239–272

Grechnev, V. V., Kuz'menko, I. V., Uralov, A. M., Chertok, I. M., Kochanov, A. A., 2013, Microwave Negative Bursts as Indications of Reconnection Between Eruptive Filaments and a Large-Scale Coronal Magnetic Environment, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 65, No. SP1, article id. S10, 9 pp.

Grechnev, V. V., Uralov, A. M., Kuzmenko, I. V., Kochanov, A. A., Chertok, I. M., Kalashnikov, S. S., 2015, Responsibility

of a Filament Eruption for the Initiation of a Flare, CME, and Blast Wave, and its Possible Transformation into a Bow Shock, *Solar Physics*, Vol. 290, Issue 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., 2016, A Tiny Eruptive Filament as a Flux-Rope Progenitor and Driver of a Large-Scale CME and Wave, *Solar Physics*, Vol. 291, Issue 4, pp. 1173–1208

Grechnev, V. V., Uralov, A. M., Kiselev, V. I., Kochanov, A. A., 2017, The 26 December 2001 Solar Eruptive Event Responsible for GLE63. II. Multi-Loop Structure of Microwave Sources in a Major Long-Duration Flare, *Solar Physics*, Vol. 292, Issue 1, article id. 3, 27 pp.

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

Kochanov, A. A., Anfinogentov, S. A., Prosovetsky, D. V., Rudenko, G. V., Grechnev, V. V., 2013, 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*, Vol. 65, No. SP1, article id. S19, 12 pp.

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., 1993, Magnetospheres of Solar Active Regions Inferred from Spectral-Polarization Observations with High Spatial Resolution, *Astrophysical Journal*, Vol. 419, pp. 398–417

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

Lesovoi, S. V., Altyntsev, A. T., Ivanov, E. F., Gubin, A. V., 2014, A 96-antenna radioheliograph, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14, pp. 864–868

Meegan, C., Lichti, G., Bhat, P. N., et al., 2009, The Fermi Gamma-ray Burst Monitor, *Astrophysical Journal*, 702, 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., 1995, New Nobeyama Radio Heliograph, *Journal of Astrophysics and Astronomy Supplement* 16, pp. 437–442
- Nita, G.M.; Fleishman, Gregory D.; Jing, Ju; Lesovoi, Sergey V., Bogod, V.M., Yasnov, L.V., Wang, H., Gary, D.E., 2011, Three-dimensional Structure of Microwave Sources from Solar Rotation Stereoscopy Versus Magnetic Extrapolations, *Astrophysical Journal*, Vol. 737, Issue 2, article id. 82, 12 pp.
- Nita, G. M., Gary, D. E., Lee, J., 2004, Statistical Study of Two Years of Solar Flare Radio Spectra Obtained with the Owens Valley Solar Array, *Astrophysical Journal*, Vol. 605, Issue 1, pp. 528–545
- Smolkov, G. I., Pistolkors, A. A., Treskov, T. A., Krissinel, B. B., Putilov, V. A., 1986, 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, *Astrophysics and Space Science* 119, pp. 1–4
- Uralov, A.M., Lesovoi, S.V., Zandanov, V.G., Grechnev, V.V., 2002, Dual-filament initiation of a Coronal Mass Ejection: Observations and Model, *Solar Physics*, 208, pp. 69–90.
- Wang, Z., Gary, D. E., Fleishman, G. D., White, S. M., 2015, *Astrophysical Journal*, Vol. 805, Issue 2, article id. 93, 13 pp.
- Yan, Y., Zhang, J., Wang, W., Liu, F., Chen, Z., Ji, G., 2009, The Chinese Spectral Radioheliograph – CSRH, *Earth, Moon, and Planets*, Vol. 104, Issue 1–4, pp. 97–100
- Zhdanov, D. A., Zandanov, V. G., 2015, Observations of Microwave Fine Structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope, *Solar Physics*, 290, pp. 287–294.
- Zirin, H., Baumert, B. M., Hurford, G. J., 1991, The microwave brightness temperature spectrum of the quiet sun, *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), Vol. 370, pp. 779–783