

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СОЛНЕЧНОМ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРЕ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА И РЯДЕ ДРУГИХ ИНСТРУМЕНТОВ

RESULTS OF JOINT OBSERVATIONS WITH SOLAR SPECTROPOLARIMETER OF METER RANGE WAVELENGTHS AND OTHER INSTRUMENTS

Н.О. Муратова 

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

А.Ю. Федотова 

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

Ю.Н. Шамсутдинова 

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

N.O. Muratova

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

A.Yu. Fedotova

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

J.N. Shamsutdinova

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

Аннотация. Излучение Солнца регистрируется в широком диапазоне частот — от гамма- до радиоизлучения. Таким образом, совместные наблюдения на разных приборах и в различных частотных диапазонах позволяют представить комплексную картину развития событий на Солнце и подтвердить достоверность данных отдельных приборов. В статье приводится сравнительный анализ данных, полученных на Солнечном спектрополяриметре метрового диапазона (ССМД) и с помощью ряда других приборов. Для исследования были выбраны три события, зарегистрированные на ССМД в 2019 г.: радиовсплески III типа с 05:05 UT до 05:12 UT и II типа с 05:12 UT до 05:19 UT 6 мая и III типа с 05:03 UT по 05:21 UT 14 апреля. Для сравнения использовались данные следующих инструментов: ССМД, СРГ (Сибирский радиогелиограф), SDO/AIA (блок формирования изображений солнечной атмосферы Atmospheric Imaging Assembly на орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory), Wind/WAVES (инструмент для исследования плазменных и радиоволновых явлений на космическом аппарате Wind), наземный радиоспектрополяриметр AMATERAS, космический аппарат GOES-14. Результаты проведенного анализа показали, что данные всех инструментов хорошо коррелируют друг с другом и соответствуют характерным особенностям каждого события. Данное исследование также могло подтвердить достоверность данных, полученных на ССМД.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение, радиовсплески II типа, радиовсплески III типа, солнечные вспышки, солнечные события, инструменты.

Abstract. Solar radiation is emitted in the wide frequency range from gamma to radio emission. Hence, joint observations from different instruments and frequency ranges let us to complete full representation of the evolution of solar events and confirm authenticity of data from specific instruments. In this article, we present comparative analysis data from Solar Spectropolarimeter of Meter Range wavelengths (SSMD) and other instruments. For the investigation we have chosen three solar events registered with SSMD in 2019: type III radio bursts on May 6 from 05:05 UT to 05:12 UT, type II radio bursts on May 6 from 05:12 UT to 05:19 UT, and type III radio bursts on April 14 from 05:03 UT to 05:21 UT. For comparison we apply data from the following instruments: SSMD, SRH (Siberian Radioheliograph), SDO/AIA (Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)), Wind/WAVES (WAVES investigation on the WIND spacecraft), ground-based spectropolarimeter AMATERAS, spacecraft GOES-14. As a result, we can conclude that they are in good correlation with each other and correspond to outstanding characteristics for each event. The investigation also confirms the SSMD data authenticity.

Keywords: Sun, radio radiation, type II radio bursts, type III radio bursts, solar flares, solar events, instruments.

ВВЕДЕНИЕ

Излучение Солнца регистрируется в широком диапазоне частот — от гамма- до радиоизлучения. Сравнение данных различных инструментов в нескольких частотных диапазонах при исследовании

солнечной активности позволяет проанализировать выбранные явления, воссоздать полную картину развития событий на Солнце и удостовериться в истинности наблюдаемых событий. Для этого используются данные как космических, так и наземных инструментов.

Цель данной работы заключалась в рассмотрении событий, зарегистрированных на Солнечном спектрополяриметре метрового диапазона (ССМД) [Muratova et al., 2019] совместно с другими инструментами в разных частотных диапазонах, и подтверждении их достоверности.

В метровом диапазоне можно наблюдать огромное количество солнечных явлений, проявляющихся в виде радиовсплесков разных типов. Их первые наблюдения начались в 1942 г. с открытием радиоизлучения Солнца. Таким наблюдениям было посвящено множество работ (например, [Appleton et al., 1946; McCready et al., 1947; Payne-Scott, 1949]). Одна из первых классификаций радиовсплесков была представлена Уайлдом [Wild et al., 1963]. В статье мы будем рассматривать события, связанные с радиовсплесками II и III типов [Wild, McCready, 1950]. К III типу относятся радиовсплески с быстрым дрейфом по частоте, которые продуцируются нетепловыми электронами, распространяющимися вдоль открытых силовых линий от Солнца в межпланетную среду. Ко II типу относятся радиовсплески с медленным дрейфом по частоте. В их формировании участвуют электроны, ускоренные ударными волнами, распространяющимися в солнечной короне. В статье за основу были взяты данные, полученные на ССМД. Для исследования были выбраны три события за 2019 г. К ним относятся радиовсплески III (в 05:05–05:11 UT) и II (в 05:12–05:19 UT) типов, зарегистрированные 6 мая, и группа радиовсплесков III типа (в 05:04–05:20 UT), зарегистрированных 14 апреля.

Для подтверждения исследуемых событий приводятся данные прибора AMATERAS в диапазоне 100–500 МГц. Факт распространения событий в более высокие слои солнечной атмосферы можно видеть по данным приборов Wind/WAVES — RAD1 (20–1040 кГц) и RAD2 (1.075–13.825 МГц). Данные этих приборов с 05:00 до 05:30 UT для событий 6 мая и с 05:00 до 05:40 UT для событий 14 апреля представлены в виде комбинированных спектров.

В более низких слоях атмосферы Солнца мы можем наблюдать «предысторию» рассмотренных явлений. Для этого были использованы данные Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Алтынцев и др., 2020] и SDO/AIA [Lemen et al., 2012]. Первое событие, связанное со вспышкой класса M1.0, рассмотрено в период с 05:00 до 05:08 UT, второе — во время вспышки класса C9.9 с 05:10 до 05:17 UT 6 мая. Третье событие, связанное со вспышкой класса A8.0, рассматривается в периоды с 05:10 до 05:17 UT и с 05:14 до 05:30 UT 14 апреля.

Для каждого события в статье приводятся потоки рентгеновского излучения по данным GOES-14, а также потоки микроволнового излучения по данным СРГ на частоте 5.125 ГГц.

В следующем разделе будут подробнее рассмотрены инструменты и методы наблюдения, используемые при анализе данных.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Солнечный спектрополяриметр метрового диапазона — радиоспектрополяриметр, предназначенный

для наблюдения солнечных радиовсплесков различных типов в диапазоне 50–500 МГц. ССМД был успешно запущен в режим регулярных наблюдений в Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ур. Бадары) в апреле 2016 г. Наблюдения проводились с 2016 по 2020 г. На входе приемного устройства установлена логопериодическая скрещенная антенна, принимающая одновременно горизонтальную и вертикальную компоненты поляризации. Основные параметры ССМД: 4608 частотных каналов, ширина канала и шаг между ними составляют 97.656 кГц, временное разрешение — 1 с. В данном исследовании используется интенсивность (*I*-параметр Стокса). Подробное описание инструмента представлено в статье [Муратова и др., 2019]. Следует отметить, что наблюдения в данном диапазоне осложняются наличием различных помех как искусственного происхождения (от других радиоэлектронных устройств), так и от некоторых природных явлений [<https://www.slideserve.com/toussaint/srs-data-examples-powerpoint-ppt-presentation>]. В настоящий момент продолжается формирование каталога данных ССМД за период 2016–2020 гг. Данные можно получить по запросу у Н.О. Муратовой.

Для чистки изображений в каждом частотном канале находилось медианное значение интенсивности исходного сигнала за определенный интервал времени, которое затем из него вычиталось, после чего полученные значения делились на величину среднеквадратичного отклонения в канале. Из-за наличия различных по характеру помех весь диапазон 50–500 МГц условно был разделен на три части, каждая из которых обрабатывалась и отображалась по отдельности. Данные не калиброваны и представлены в относительных единицах.

Сибирский радиогелиограф (СРГ) — многоволновый Т-образный радиоинтерферометр, предназначенный для регистрации явлений на Солнце в частотном диапазоне 3–24 ГГц [<http://ckp-rf.ru/usu/73606>]. Инструмент создается в ур. Бадары. До 2020 г. прототип СРГ работал в диапазоне частот 4–8 ГГц с пространственным разрешением 21". С 2021 г. радиоинтерферометр стал работать в тестовом режиме в диапазоне 3–6 ГГц. В настоящее время строительство продолжается и планируется запустить в работу решетки в диапазоне 6–12 ГГц, а затем в 12–24 ГГц [Алтынцев и др., 2020]. Данные СРГ позволили нам получить профили потоков микроволнового излучения, а также пространственные изображения радиояркости диска Солнца на нескольких частотах.

GOES-14 (GOES-O) — космический аппарат, предназначенный для прогнозирования погодных явлений [https://www.noaasis.noaa.gov/GOES/GOES_DCS/goes_dcs.html]. Отметим, что такой тип наблюдений полезен при мониторинге солнечных явлений. По данным GOES-14 были построены профили потоков рентгеновского излучения для вспышек в диапазоне 1–8 Å. Данные доступны на [<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes>].

Для наглядного представления эволюции событий и построения профилей яркостной температуры мы использовали изображения полного диска Солнца в каналах SDO/AIA EUV 171, 304 и 94 Å со скваж-

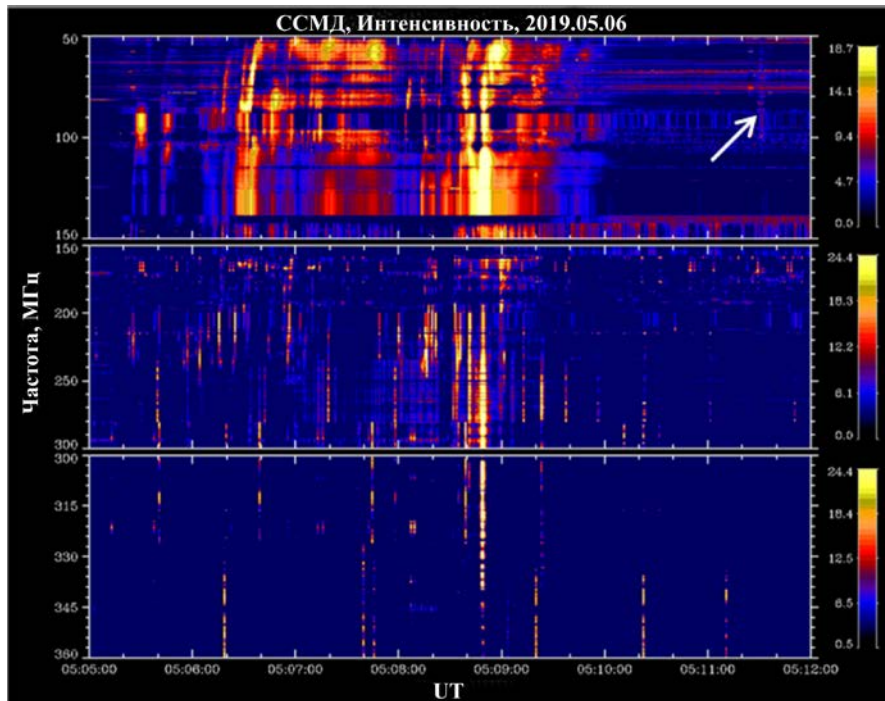


Рис. 1. Динамический спектр интенсивности группы радиовсплесков III типа, полученный по данным ССМД, для 05:05–05:12 UT 6 мая 2019 г. Белой стрелкой указан слабый радиовсплеск III типа

ностью 12 с и пространственным разрешением 0.6" [Lemen et al., 2012]. Данные SDO доступны на [https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi].

AMATERAS — широкополосный метровый радиоспектрополяриметр, предназначенный для наблюдения солнечных радиовсплесков в диапазоне частот 150–500 МГц (заметим, что, согласно исследуемым данным за 2019 г., диапазон составил 100–500 МГц). Число каналов — 16384, временное разрешение — 10 мс. Прибор регистрирует правую и левую круговые поляризации [Iwai et al., 2012].

WAVES — инструмент, установленный на космическом корабле WIND. Регистрирует плазменные и радиоволны солнечного происхождения с помощью приемников RAD1, RAD2. Частотный диапазон RAD1 составляет 20–1040 кГц, количество каналов — 256, временное разрешение — 1 мин. Частотный диапазон RAD2 составляет 1.075–13.825 МГц, количество каналов — 256, временное разрешение — 1 мин [Bougeret et al., 1995].

Данные, полученные приборами AMATERAS, Wind/WAVES, представлены в статье для каждого события в виде комбинированных спектров. Для анализа исследуемых событий было создано программное обеспечение, которое позволяет упростить и автоматизировать визуализацию динамических спектров в метровом диапазоне. Программное обеспечение автоматически загружает данные с серверов инструментов по дате события в формате FITS или SAV, затем читает и обрабатывает файлы.

Алгоритм обработки данных работает с массивами и учитывает все характеристики каждого инструмента для дальнейшего выбора интересующего участка на заданном промежутке времени. Затем проводится обработка массива данных для улучшения качества изображения. Для этого используется

метод выравнивания гистограммы, позволяющий повысить контраст областей с низким контрастом. Выравнивание гистограммы выполняется путем распределения наиболее частых значений интенсивности, что позволяет выделить всплески на общем фоне.

В результате программа решает следующие задачи: чтение файлов, калибровку (перевод данных из дБ·м в с.е.п.), предварительную обработку, компоновку данных разных инструментов с учетом их диапазона частот и значений интенсивности. На выходе получаются изображения динамических радиоспектров в метровом диапазоне на выбранном участке времени.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Первые два события, рассмотренные в статье, произошли 6 мая 2019 г.

На рис. 1 представлен динамический спектр интенсивности (I -параметр Стокса), построенный для группы радиовсплесков III типа, зарегистрированной на ССМД 6 мая 2019 г. в 05:05–05:12 UT. Длительность события составила несколько минут. На данном изображении наблюдается тонкая структура в виде одиночных коротких радиовсплесков длительностью от 1 с (разрешающая способность ССМД составляет 1 с) с быстрым частотным дрейфом от высоких частот к низким со скоростью от -13 до -20.67 МГц·с $^{-1}$ по мере распространения события в верхних слоях солнечной атмосферы. Местами можно видеть выраженное континуальное излучение, интенсивность которого также меняется в процессе эволюции события. Это событие покрывает широкий диапазон частот от 50 МГц (нижняя граница частотного диапазона ССМД) до 360 МГц. Все вышеуказанные

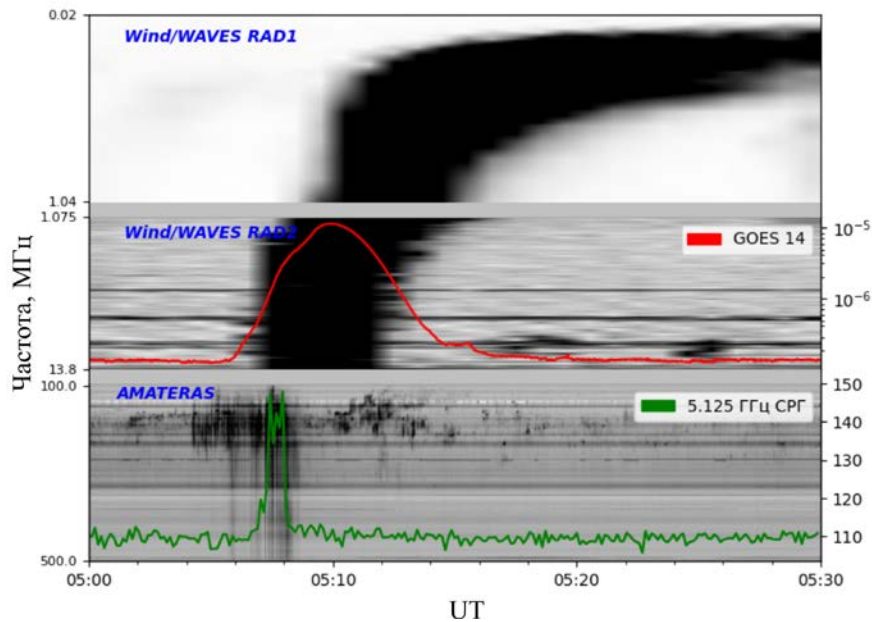


Рис. 2. Комбинированный спектр для двух событий 6 мая 2019 г., на котором представлены динамические спектры по данным приборов AMATERAS и Wind/WAVES, а также поток микроволнового излучения, зарегистрированный СРГ на частоте 5.125 ГГц, и профиль потока рентгеновского излучения на GOES-14 в диапазоне 1–8 Å

особенности характерны для радиовсплесков III типа [https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/5]. Изображения спектра по частоте неоднородны, например, наличие помех в полосе 140–160 МГц, о которых упоминалось ранее, не позволило получить более качественное изображение. Событие начинается в 05:05 UT с одиночных радиовсплесков, по мере развития занимая все более широкий частотный диапазон. Пик события, согласно полученному спектру, зарегистрирован в 05:08 UT, а к 05:10 UT оно угасает. Мы видим также слабый радиовсплеск III типа в 05:11:30 UT в полосе частот 50–110 МГц (белая стрелочка на рис. 1 и 6).

На комбинированном спектре, представленном на рис. 2 по данным AMATERAS, видна группа радиовсплесков III типа в диапазоне частот 100–500 МГц с 05:05 до 05:10 UT с быстрым дрейфом по частоте. Максимум приходится на 05:08 UT. В высоких слоях атмосферы Солнца, согласно данным приборов Wind/WAVES RAD1 (05:07–05:16 UT) и RAD2 (05:09–05:30 UT и далее), наблюдается высокоинтенсивный радиовсплеск III типа, который носит континуальный характер.

Согласно профилю интегрального микроволнового потока излучения, представленному на рис. 2 по данным СРГ на частоте 5.125 ГГц, с 05:07 до 05:12 UT наблюдаются три пика с максимумами от 142 до 149 с.е.п. По данным GOES-14, в максимуме вспышки рентгеновское излучение составило 10^{-6} Вт·м⁻².

Далее проводится анализ события по пространственным изображениям, полученным по данным СРГ и SDO/AIA. В 05:05–05:08 UT произошла вспышка класса M1.0 на солнечном диске около активной области (АО) NOAA 12740 [https://suntoday.lmsal.com/suntoday/?suntoday_date=2019-05-06].

На рис. 3 представлено изображение полного диска Солнца для 05:08 UT 6 мая 2019 г. по данным

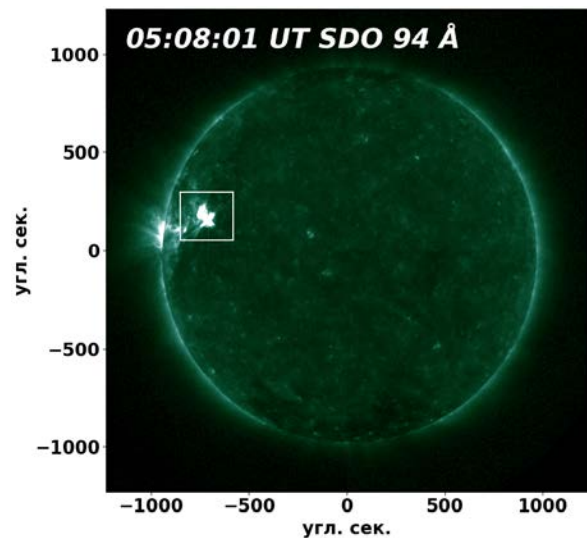


Рис. 3. Изображение полного диска Солнца, полученное по данным SDO/AIA на длине волны 94 Å для 6 мая 2019 г. В белом прямоугольнике размером 270"×246" отмечена область максимальной стадии вспышки класса M1.0 в 05:08 UT

SDO/AIA на длине волны 94 Å. В северо-западной части диска белым прямоугольником (270"×246") отмечена вспышка в максимальной фазе.

На рис. 4, а–в представлены пространственные изображения вспышки на длинах волн 94, 304 и 131 Å, полученные по данным SDO/AIA, на которых прослеживается рост излучения, а в 05:08 UT видна максимальная стадия вспышки. Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5, 0.7 и 0.9 от максимумов карт яркостной температуры.

Второе рассматриваемое событие — радиовсплеск II типа с медленным дрейфом от высоких частот к низким (рис. 5). Скорость дрейфа составляет -0.308 МГц·с⁻¹. Это событие происходит практически

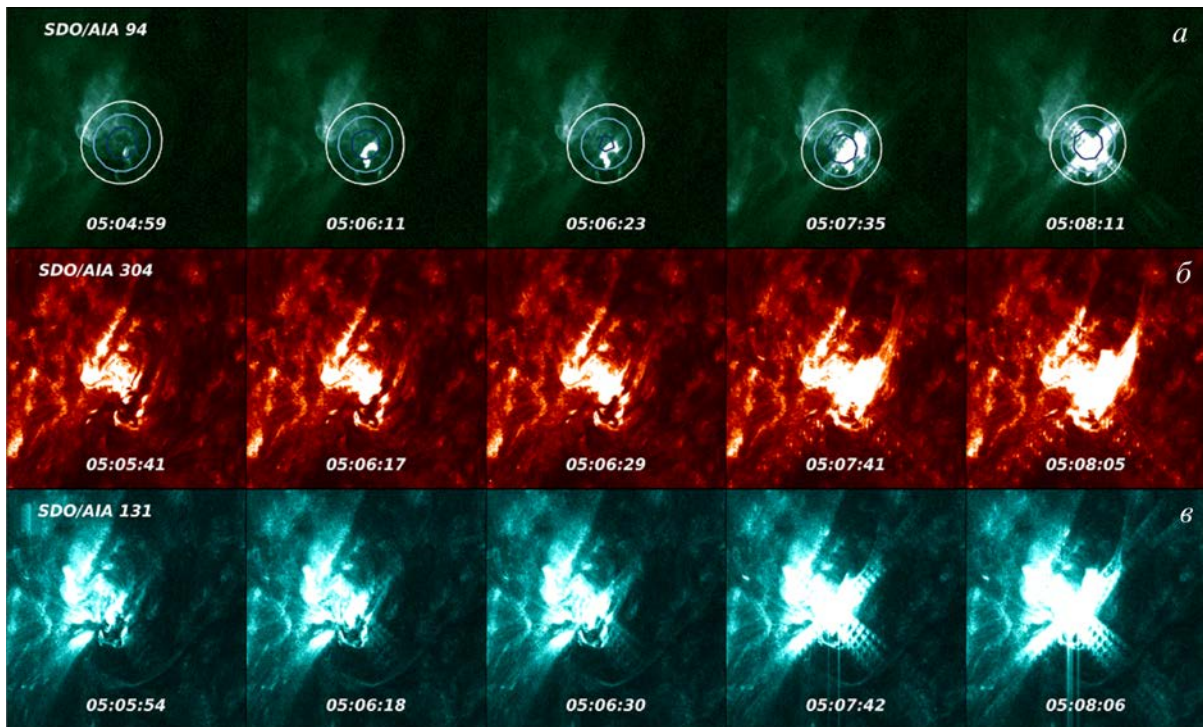


Рис. 4. Пространственные изображения вспышки с 05:05 до 05:08 UT 6 мая 2019 г. по данным SDO/AIA на длинах волн 94, 304 и 131 Å (а–в). Контурами показано микроволновое излучение по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5 (синяя линия), 0.7 (голубая линия) и 0.9 (белая линия) от максимумов яркостной температуры. Размер кадров 125"×125"

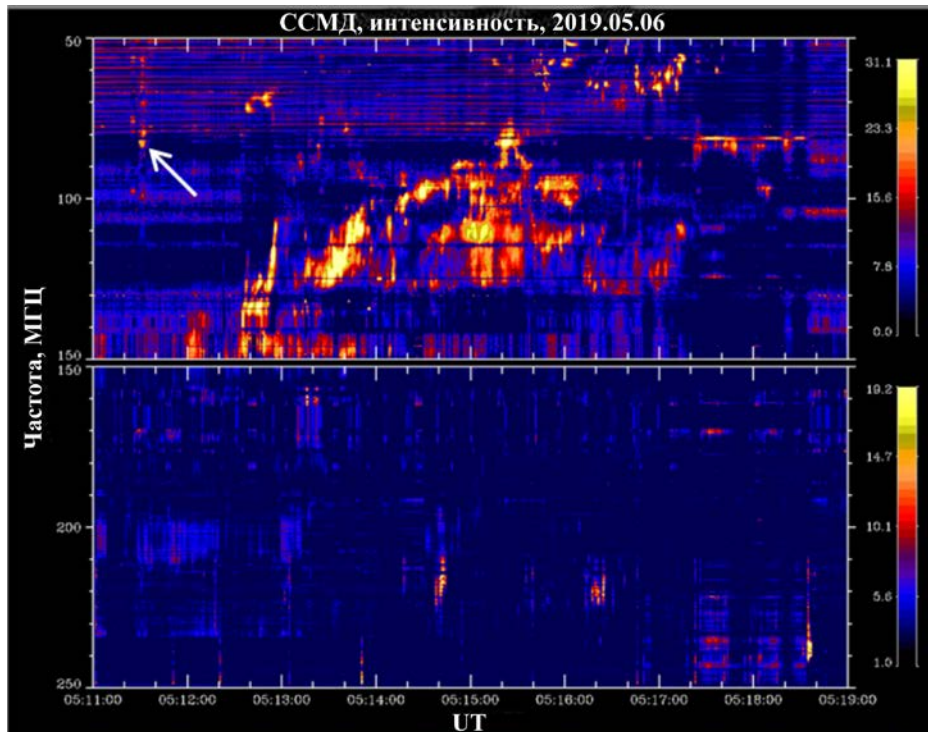


Рис. 5. Динамический спектр интенсивности радиовсплеска II типа, построенный по данным ССМД для 05:11–05:19 UT 6 мая 2019 г.

сразу после всплеска III типа (см. рис. 1) с разницей в 2 мин (без учета слабого одиночного всплеска в 05:11:30 UT), что является типичной ситуацией [https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/5]. В 05:11:30 UT мы видим короткий слабый всплеск III типа, затем около 05:12 UT начинается всплеск II

типа, который продолжается несколько минут, примерно до 05:19 UT. В основном всплеск II типа занимает нижнюю часть спектра от 75–150 МГц, также присутствуют его фрагменты на более высоких частотах от 150 до 230 МГц и более низких 50–75 МГц. В диапазоне 150–180 МГц наблюдались сильные по-

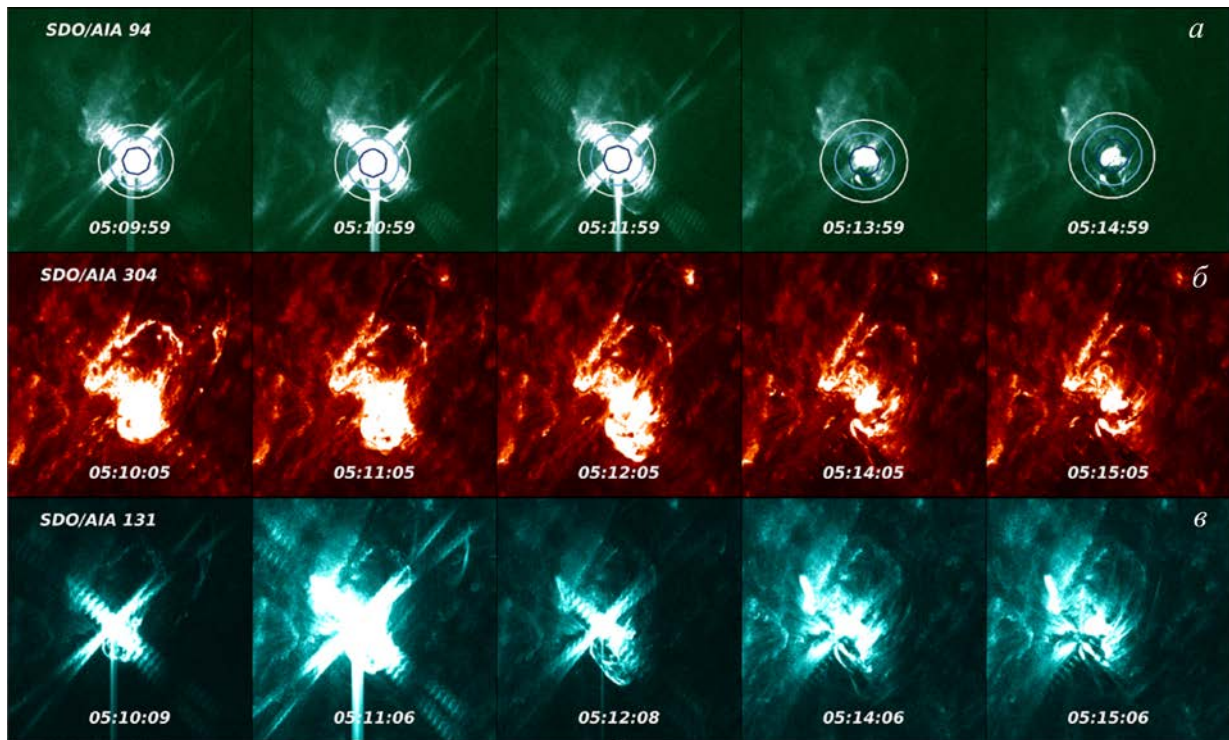


Рис. 6. Пространственные изображения вспышки с 05:10 до 05:15 UT 6 мая 2019 г., полученные по данным SDO/AIA на длинах волн 94, 304 и 131 Å (а–в). Контурами показано микроволновое излучение по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5 (синяя линия), 0.7 (голубая линия) и 0.9 (белая линия) от максимумов яркостной температуры. Размер кадров 125"×125"

мехи, что помешало выделить сигнал в этой полосе. Рассматриваемое событие было более интенсивным в сравнении с предыдущим.

Рассмотрев комбинированные спектры на рис. 2 по данным AMATERAS, в диапазоне частот 100–200 МГц мы также видим радиовсплеск II типа в 05:11–05:20 UT. В верхней части диапазона RAD2 (примерно от 10 кГц и выше) с 05:15 до 05:26 UT событие прослеживается слабо. По профилю потока микроволнового интегрального излучения зарегистрировать отклик на вспышку не удалось. Профиль рентгеновского излучения по данным GOES-14 имеет форму пологого спуска. Максимальное значение рентгеновского излучения фиксируется в 05:15 UT и составляет 10^{-6} Вт·м⁻².

В северо-западной части солнечного диска около АО NOAA 12740 на пространственных изображениях с 05:10 до 05:17 UT наблюдается вспышка, которая соответствует классу C9.9 по данным [https://suntoday.lmsal.com/suntoday/?suntoday_date=2019-05-06]. Эволюция вспышки с 05:10 до 05:15 UT по данным SDO/AIA представлена на рис. 6 на длинах волн 94 (а), 304 (б) и 131 Å (в). На всех длинах волн наблюдается плавное уменьшение яркости, а максимум вспышки приходился на 05:10 UT. Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5, 0.7 и 0.9 от максимумов карт яркостной температуры.

По данным [https://aia.lmsal.com/aia_cadence/aia_0193_rdiff_0144_sum_20190506_0500/AIA_0193_RDIF_0144_SUM_20190506_0500.html] на сайте [https://suntoday.lmsal.com/suntoday/?suntoday_date=2

019-05-06], в 05:01:28–05:39:28 UT в той же АО наблюдалась ударная корональная волна, которая, по нашим предположениям, связана с корональным радиовсплеском II типа [Cairns et al., 2000], зарегистрированным на ССМД и AMATERAS в диапазоне 50–250 МГц (см. рис. 2, 5).

Последним рассматривается событие (рис. 7, 8), состоящее из радиовсплесков III типа, зарегистрированных 14 апреля 2019 г.

В целом событие имеет характер шумовой бури и представляется на спектрах в виде групп и отдельных радиовсплесков III типа, следующих с перерывами на протяжении всего дня наблюдений. Событие длительное, поэтому мы представили только два фрагмента динамических спектров — с 05:03 до 05:09 UT и с 05:14 до 05:21 UT. Первый фрагмент (см. рис. 7) представляет собой группу слабых радиовсплесков III типа с непрерывным фоновым излучением, в которой можно выделить слабую тонкую структуру и интенсивный всплеск в 05:05 UT. На втором фрагменте (см. рис. 8) видна группа более интенсивных радиовсплесков (начало около 05:15 UT) с более высоким, по сравнению с первым фрагментом, уровнем непрерывного излучения. Отчетливо видны радиовсплески в 05:16 UT и три интенсивных радиовсплеска в конце группы в период с 05:18 до 05:19 UT. К 05:20 UT событие затухает. Скорость дрейфа отдельных радиовсплесков для двух фрагментов варьируется от -13.2 до -26.67 МГц·с⁻¹. Событие занимает преимущественно нижнюю часть спектра, полученного с помощью ССМД, — от 50 до 160 МГц и продолжается в течение долгого времени, следуя группами и отдельными всплесками.

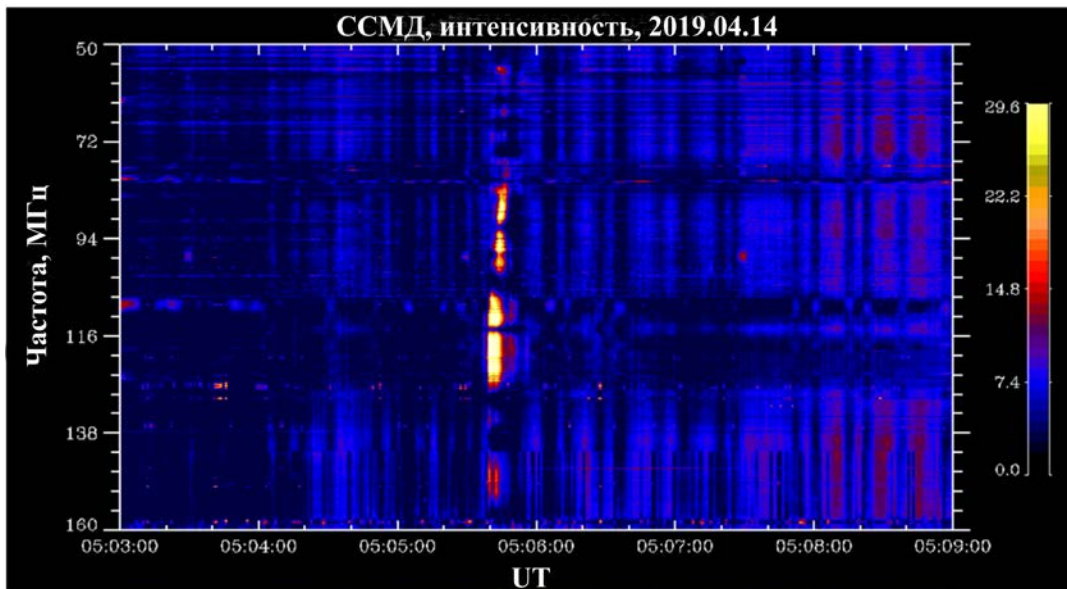


Рис. 7. Динамический спектр интенсивности группы радиовсплесков III типа, зарегистрированной ССМД 14 апреля 2019 г., для 05:03–05:09 UT

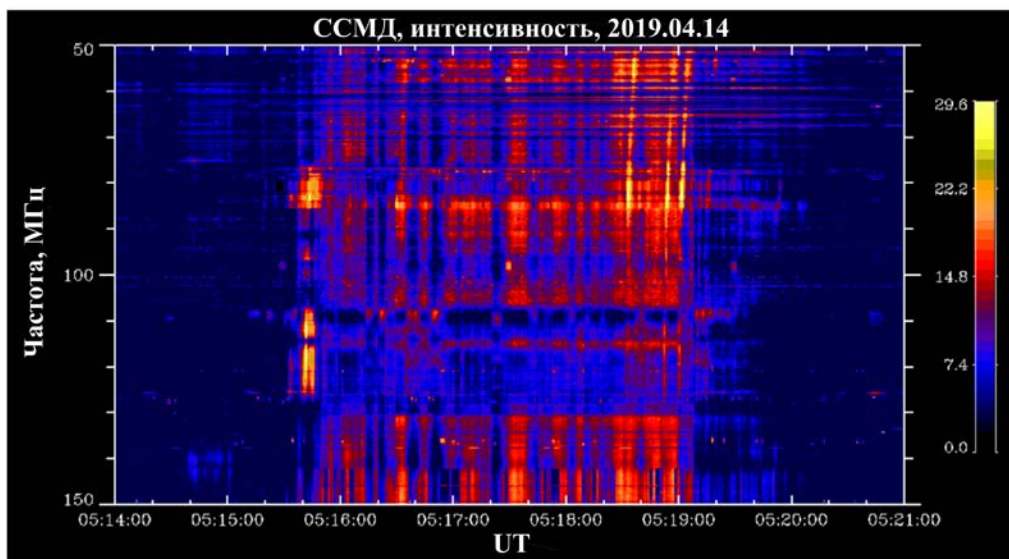


Рис. 8. Динамический спектр интенсивности группы радиовсплесков III типа, зарегистрированной ССМД 14 апреля 2019 г., для 05:14–05:21 UT

На комбинированном спектре (рис. 9) с 05:00 до 05:21 UT по данным AMATERAS в диапазоне 100–200 МГц мы можем увидеть множество едва заметных радиовсплесков III типа. В целом событие носит характер шумовой бури. На фоне множества всплесков хорошо выделяются радиовсплески в 05:06 и 05:15 UT. Отдельные мелкие всплески, находящиеся выше 150 МГц по диапазону, возможно, образуют шумовые бури I типа. Подобная активность в течение всего дня наблюдалась на радиоспектрографе обсерватории Learmonth [https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/6/]. В верхних слоях по данным Wind/WAVES можно выделить два высокоинтенсивных радиовсплеска III типа (первый начинается в 05:03 UT, второй в 05:14 UT), которые имеют континуальный характер.

По данным SRG (зеленая кривая) на частоте 5.125 ГГц, с 05:00 до 05:14 UT наблюдается неодно-

родный рост потока микроволнового излучения интенсивностью 16–18 с.е.п. С 05:15:00 до 05:23:00 UT видны также несколько всплесков радиоизлучения от 19.5 до 18.2 с.е.п.

По профилю рентгеновского излучения на GOES-14 (красная кривая) в 05:01–05:05 UT невозможно определить вспышку из-за интенсивного фонового шума на уровне 10^{-6} Вт·м⁻². Однако с 05:15 до 05:22 UT отчетливо выражен профиль вспышки, значение в максимуме составляет 10^{-6} Вт·м⁻². Фоновый поток излучения до 05:40 UT меняется слабо. На рис. 10 показан полный диск Солнца по данным SDO/AIA на длине волны 94 Å в 05:18 UT. Белым прямоугольником обозначена вспышка в виде сложной системы петель с ярким узким волокном в его правой нижней части.

По пространственным изображениям (рис. 11) была зарегистрирована вспышка класса A8.0 сложной

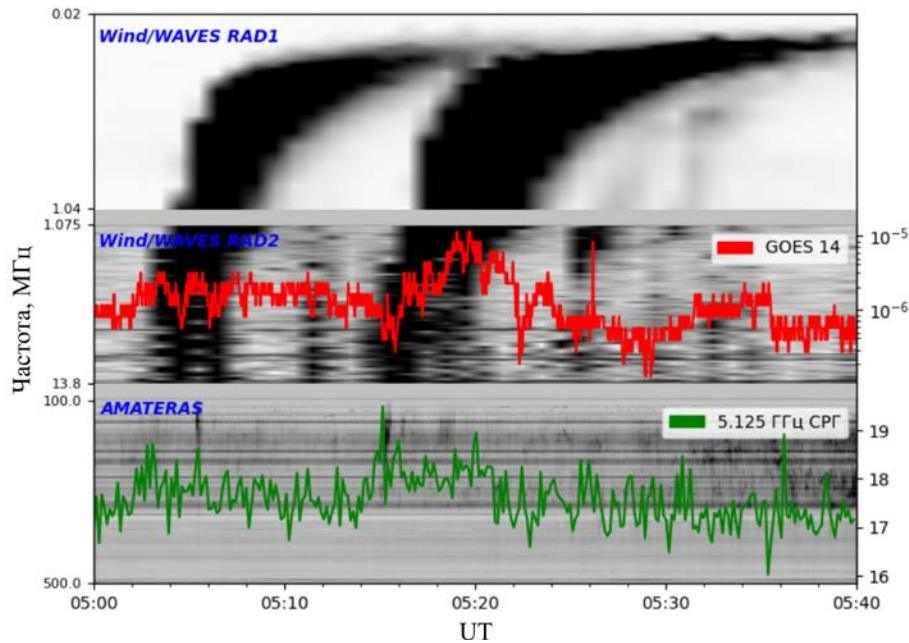


Рис. 9. Комбинированный спектр для событий 14 апреля 2019 г., на котором представлены динамические спектры по данным AMATERAS и Wind/WAVES, а также поток интегрального микроволнового излучения по данным CPG на частоте 5.125 ГГц и профиль потока рентгеновского излучения на GOES-14 в диапазоне 1–8 Å

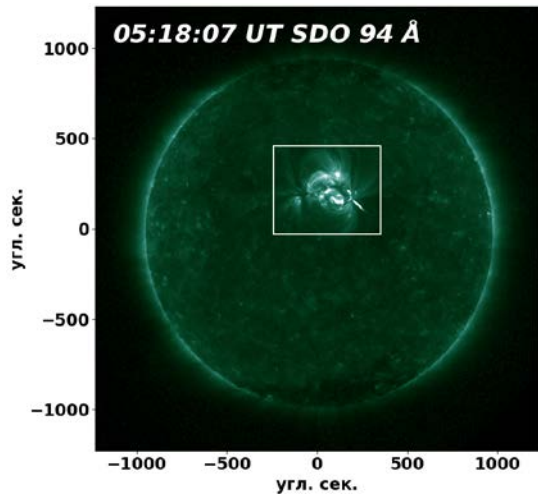


Рис. 10. Изображение полного диска Солнца по данным SDO/AIA для 05:18 UT 14 апреля 2019 г. на длине волны 94 Å. Белым прямоугольником выделена область вспышки A8.0 размером 492"×600"

конфигурации в АО с координатами N12W00. На панелях представлены изображения, полученные SDO/AIA на длинах волн 304 (а), 171 (б), 335 Å (в). Например, на рис. 11, а в 05:00 UT наблюдается яркий источник, который в 05:02 UT немного пригасает, а затем снова разгорается и почти не меняется в дальнейшем. Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по данным CPG на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5, 0.7 и 0.9 от максимумов яркостной температуры.

С 05:13 до 05:19 UT вспышка наблюдалась по данным SDO/AIA на длинах волн 304, 171 и 335 Å (рис. 12). На рисунке прослеживается эволюция вспышки (в виде яркого волокна). Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по дан-

ным CPG на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5, 0.7 и 0.9 от максимумов яркостной температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы использовали данные нескольких инструментов для анализа трех событий 2019 г., зарегистрированных на ССМД: 6 мая с 05:05 до 05:12 UT первое событие, с 05:12 до 05:19 UT второе и 14 апреля с 05:03 до 05:09 UT и с 05:14 до 05:21 UT третье.

В качестве первого события рассматривалась группа радиовсплесков III типа, занимающая широкий частотный диапазон. Всплески характеризуются быстрым дрейфом по частоте (скорость дрейфа отдельных всплесков составляла от -13 до -20.67 МГц·с $^{-1}$). Наблюдается также (см. рис. 1) тонкая структура в виде одиночных коротких радиовсплесков длительностью от 1 с и выраженное континуальное излучение. Сравнительный анализ показал следующее: группу всплесков III типа по данным AMATERAS и интенсивный всплеск III типа по данным Wind/WAVES RAD1 и RAD2; отклики с максимумами от 142 до 149 с.е.п. в потоке микроволнового излучения, которые относятся к АО NOAA 12740 (что видно по данным SDO/AIA на длине волны 94 Å, см. рис. 3); один широкий отклик на вспышку класса M1.0 на профиле потока рентгеновского излучения на GOES-14.

В качестве второго события был рассмотрен радиовсплеск II типа (см. рис. 5). Это событие следует практически сразу после радиовсплеска III типа и характеризуется медленным дрейфом по частоте (-0.308 МГц·с $^{-1}$). В результате сравнения данных различных инструментов мы видим радиовсплеск II типа по данным AMATERAS и слабое проявление события по данным RAD2 на Wind/WAVES; на RAD1

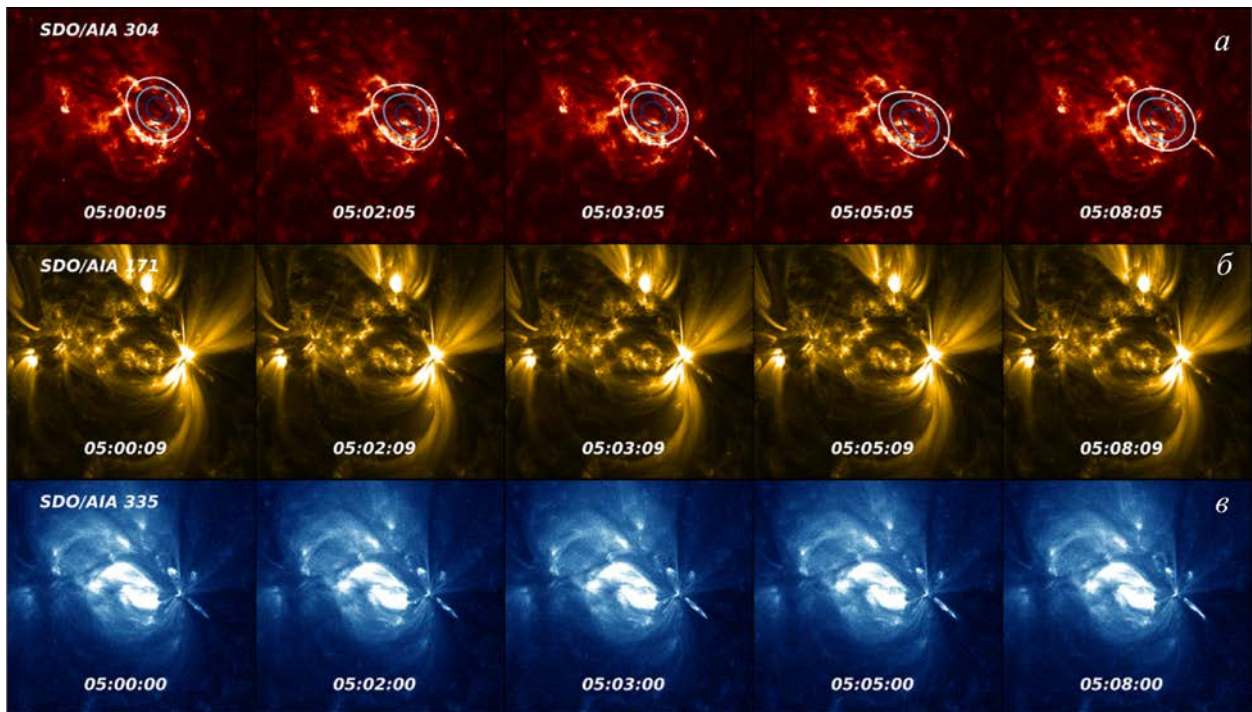


Рис. 11. Эволюция вспышки класса A8.0 на пространственных изображениях по данным SDO/AIA на длинах волн 304, 171 и 335 Å (а–в) с 05:00 до 05:08 UT 14 апреля 2019 г. Размер кадров 400"×400". Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5 (синяя линия), 0.7 (голубая линия) и 0.9 (белая линия) от максимума яркостной температуры

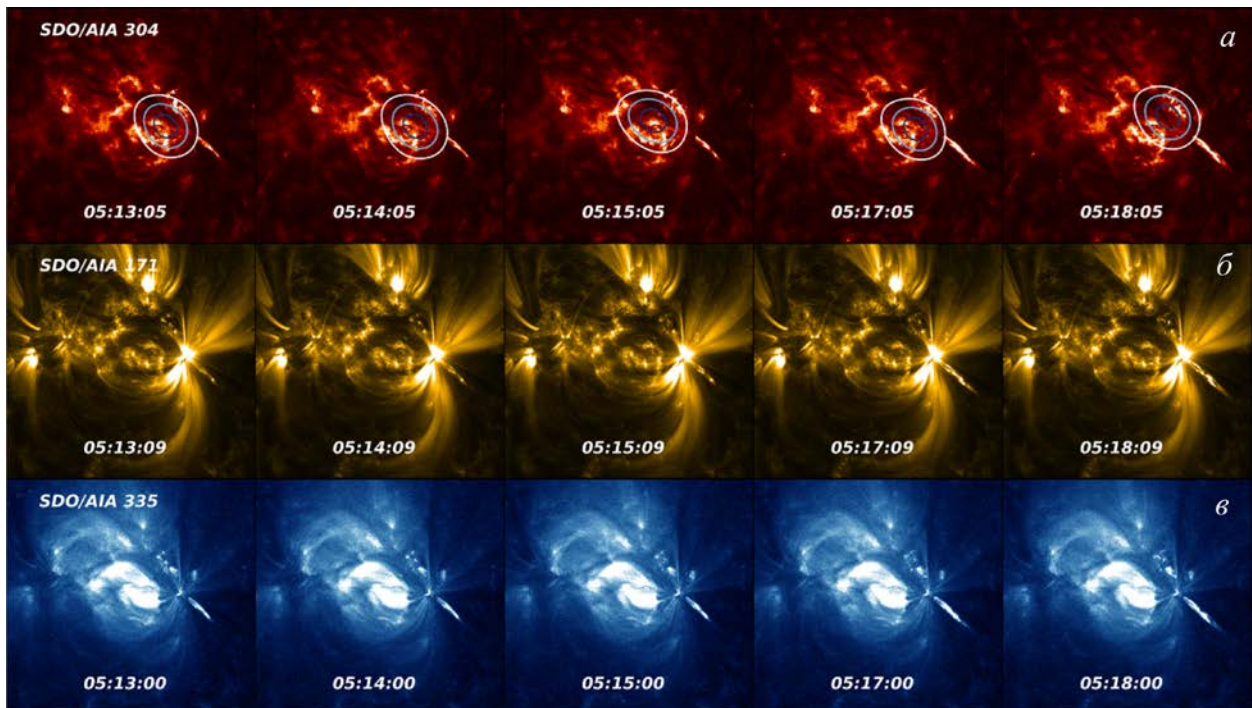


Рис. 12. Эволюция вспышки класса A8.0 на пространственных изображениях по данным SDO/AIA на длинах волн 304, 171 и 335 Å (а–в) с 05:14 до 05:18 UT 14 апреля 2019 г. Размер кадров 400"×400". Контурами обозначено микроволновое излучение вспышки по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц на уровнях 0.5 (синяя линия), 0.7 (голубая линия) и 0.9 (белая линия) от максимума яркостной температуры

активность не наблюдалась. На профиле потока рентгеновского излучения на GOES-14 виден слабый отклик на вспышку класса C9.9. На пространственных изображениях по данным SDO/AIA на длинах волн 94, 304 и 131 Å наблюдается затухающая вспышка с максимумом в 5:10 UT. В этот же период

по разностным изображениям SDO/AIA на длинах волн 335, 211 и 193 Å наблюдалась ударная волна в той же АО NOAA 12740. По нашим предположениям, корональная ударная волна могла быть причиной формирования коронального радиовсплеска II типа, зарегистрированного ССМД и AMATERAS.

В качестве третьего события (см. рис. 7, 8) рассматривались две группы радиовсплесков III типа (в целом событие длилось весь день 14 апреля в виде групп и отдельных радиовсплесков). Это событие с более узкополосным спектром по сравнению с первым рассмотренным событием (см. рис. 1). Скорость дрейфа отдельных всплесков составляла от -13.2 до -26.67 МГц·с⁻¹. На фоне всплесков присутствует континуальное излучение, более интенсивное с 05:14 до 05:21 UT. В начале каждой группы хорошо выделяются одиночные всплески III типа, в конце второй группы несколько короткоживущих узкополосных всплесков. В этом случае сравнение с другими инструментами показало следующее: по данным AMATERAS видно множество едва заметных радиовсплесков III типа, образующих шумовую бурю, на фоне которой хорошо выделяются пара более интенсивных радиовсплесков; по данным Wind/WAVES хорошо прослеживаются два интенсивных радиовсплеска III типа; на профиле микроволнового излучения по данным CRG на частоте 5.125 ГГц виден рост потока и выделяются два отклика на вспышку. По профилю рентгеновского излучения на GOES-14 из-за высокого уровня шума невозможно выделить вспышку. В АО с координатами N12W00 была отмечена вспышка класса A8.0, показанная на изображении по данным SDO/AIA на длине волны 94 Å. На пространственных изображениях с SDO/AIA на 304 и 171 Å изображена вспышка сложной конфигурации и хорошо виден участок в виде яркого узкого волокна, направленного вверх. Однако по данным CRG на частотах 4.5, 5.125 ГГц вспышка изменялась слабо.

Результаты анализа данных разных приборов показывают, что они хорошо коррелируют между собой и соответствуют характерным особенностям каждого события. Таким образом, благодаря совместным наблюдениям мы получили полную картину развития событий, зарегистрированных на ССМД, и подтвердили их достоверность.

Авторы благодарят рецензентов за редактирование статьи. Авторы благодарят коллективы инструментов WAVES, SWAVES, GOES, SDO/AIA за предоставление открытого доступа к данным их наблюдений. Результаты получены с использованием Солнечного спектрополяриметра метрового диапазона (ССМД) и уникальной научной установки «Сибирский солнечный радиотелескоп» [<http://ckp-rf.ru/usu/73606>].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Н.О. Муратова, А.Ю. Федотова, Ю.Н. Шамсутдинова), РФФИ и Лондонского королевского общества (грант № 21-52-10012 КО_а, Ю.Н. Шамсутдинова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцева А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).

Муратова Н.О., Муратов А.А., Кашапова Л.К. Результаты работы нового спектрополяриметра для наблюдения солнечного радиационного излучения в диапазоне 50–500 МГц. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 3–10. DOI: [10.12737/szf-53201901](https://doi.org/10.12737/szf-53201901).

Appleton E.V., Hey J.S. Circular polarization of solar radio noise. *Nature*. 1946. Vol. 158, iss. 4010. P. 339. DOI: [10.1038/158339a0](https://doi.org/10.1038/158339a0).

Bougeret J.-L., Kaiser M.L., Kellogg P.J., et al. WAVES: The radio and plasma wave investigation on the Wind spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1995. Vol. 71, iss. 1-4. P. 231–263. DOI: [10.1007/BF00751331](https://doi.org/10.1007/BF00751331).

Cairns I.H., Robinson P.A., Zank G.P. Progress on coronal, interplanetary, foreshock, and outer heliospheric radio emissions. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 2000. Vol. 17, iss. 1. P. 22–34. DOI: [10.1071/AS00022](https://doi.org/10.1071/AS00022).

Iwai K., Tsuchiya F., Morioka A., Misawa H. IPRT/AMATERAS: A new metric spectrum observation system for solar radio bursts. *Solar Phys.* 2. Vol. 277, iss. 2. P. 447–457. DOI: [10.1007/s11207-011-9919-y](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9919-y).

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. 1-2. P. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).

McCready L.L., Pawsey J.L., Payne-Scott R. Solar radiation at radio frequencies and its relation to sunspots. *Proc. of Roy. Soc. A: Math. and Phys. Sci.* 1947. Vol. 190, iss. 1022. P. 357–375. DOI: [10.1098/rspa.1947.0081](https://doi.org/10.1098/rspa.1947.0081).

Payne-Scott R. Bursts of solar radiation at metre wavelengths. *Austral. J. Sci. Res. A.* 1949. Vol. 2. P. 214–227. DOI: [10.1071/PH490214](https://doi.org/10.1071/PH490214).

Wild J.P., McCready L.L. Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelengths. *Austral. J. Sci. Res. A.* 1950. Vol. 3. P. 387–398. DOI: [10.1071/PH500387](https://doi.org/10.1071/PH500387).

Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A. Solar bursts. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1963. Vol. 1, no. 1. P. 291–366. DOI: [10.1146/annurev.aa.01.090163.001451](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.01.090163.001451).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606> (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: https://www.atnf.csiro.au/pasa/17_1/cairns/paper/index.html (дата обращения 17 сентября 2021 г.).

URL: <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes> (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: https://www.noaa.gov/GOES/GOES_DCS/goes_dcs.html (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/6 (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi> (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/5 (дата обращения 17 сентября 2021 г.).

URL: <https://www.slideserve.com/toussaint/srs-data-examples-powerpoint-ppt-presentation> (дата обращения 16 сентября 2021 г.).

URL: https://suntoday.lmsal.com/suntoday/?suntoday_date=2019-05-06 (дата обращения 17 сентября 2021 г.).

URL: https://aia.lmsal.com/aia_cadence/aia_0193_rdiff_0144_sum_20190506_0500/AIA_0193_RDIF0144_SUM_20190506_0500.html (дата обращения 17 сентября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Муратова Н.О., Федотова А.Ю., Шамсутдинова Ю.Н. Результаты совместных наблюдений на Солнечном спектрополяриметре метрового диапазона и ряде других инструментов. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 24–33. DOI: [10.12737/szf-81202203](https://doi.org/10.12737/szf-81202203).