

ЭРУПЦИИ СПОКОЙНЫХ ВОЛОКОН И КОРОНАЛЬНЫЕ ДЖЕТЫ КАК ПРИЧИНЫ ДЕПРЕССИЙ МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

© 2021 г. И. В. Кузьменко¹, *

¹ Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kuzmenko_irina@mail.ru

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

После доработки 27.08.2021 г.

Принята к публикации 30.08.2021 г.

По данным различных спектральных диапазонов проведено исследование нескольких солнечных событий с отрицательными всплесками разного типа в микроволновом диапазоне. Использовались данные интегрального потока радиоизлучения, полученные в Уссурийской обсерватории, обсерватории Нобеема, данные Сети солнечных радиотелескопов BBC США (RSTN), спектрополяриметра ИСЗФ СО РАН. Анализ изображений проводился по данным космической обсерватории SDO/AIA в канале 304 Å и радиогелиографа Нобеема на частоте 17 ГГц. Показано, что причиной “изолированных” депрессий радиоизлучения являлось поглощение излучения радиоисточников и/или обширных областей спокойного Солнца низкотемпературным веществом крупного эруптивного волокна в отсутствие вспышек, что подтвердило выводы, сделанные в предыдущих исследованиях. Выявлено, что причиной отрицательных всплесков типа “депрессия перед всплеском” было затенение окололимбового радиоисточника веществом корональных джетов. В случае слабой вспышки, сопутствующей джету, отрицательный всплеск также мог иметь тип “изолированный”. Рассмотрен случай возникновения более глубокой депрессии радиоизлучения на высоких частотах по сравнению с низкими, о чем ранее не сообщалось. Показано, что отрицательные всплески являются не такими редкими явлениями, как считалось ранее.

Ключевые слова: депрессия радиоизлучения, микроволновый отрицательный всплеск, радиоисточник, эруптивный протуберанец, корональный джет

DOI: 10.31857/S0004629921120045

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование спорадической солнечной активности по микроволновому радиоизлучению позволяет изучать эруптивные события. В некоторых из них наблюдаются так называемые отрицательные радиовсплески, представляющие собой временное понижение интегрального потока радиоизлучения ниже квазистационарного уровня вне всплесков. Классификация отрицательных всплесков была сделана в работах [1, 2] по записям радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц, где они впервые были обнаружены. Выделяются следующие типы: “депрессия перед всплеском”, “депрессия, наложенная на постепенный всплеск”, “изолированный” и, наиболее часто встречающийся и изученный — “депрессия после всплеска”. Отрицательные всплески считаются довольно редкими явлениями: за период 1951–1972 гг. в Оттаве было зарегистрировано только 12 таких событий, а за период 1991–2010 гг. по данным Solar Geophysical Data их насчитывалось 67 [3].

Изучение некоторых событий с отрицательными всплесками по данным различных спек-

тральных диапазонов показали, что, в основном, причиной депрессий радиоизлучения являлось поглощение низкотемпературной плазмой эруптивного волокна излучения локальных радиоисточников, а также обширных областей спокойного Солнца [1–6]. Отрицательные всплески происходили также в результате экранирования ярких окололимбовых радиоисточников веществом джето-подобных выбросов [7, 8]. Напомним, что джеты — это мелкомасштабные выбросы солнечной плазмы, наблюдаемые в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) и рентгеновском диапазонах. Еще одной возможной причиной отрицательных всплесков является уменьшение излучения от радиоисточника в процессе развития активной области [9, 10].

Зависимость радиопоглощения от параметров поглощающего вещества и частоты регистрируемого радиоизлучения дает возможность оценить параметры поглотителя по радиоданным на нескольких частотах. Метод оценки параметров выброса по величине радиопоглощения описан в [11] и состоит в моделировании спектрального

хода интегрального потока солнечного радиоизлучения при наличии поглощающей среды на пути к наблюдателю, и в поиске таких параметров плазмы выброса, которые приводят к наилучшему соответствию измеренным на разных частотах величинам радиопотока. Модельные расчеты для ряда событий показали, что поглощающее радиоизлучение вещество имело температуру $\sim 10^4$ К и занимало площадь меньше 10% от площади солнечного диска [3]. Оцененные массы поглотителя были сравнимы с массами крупных протуберанцев.

Настоящая работа посвящена выяснению причин отрицательных всплесков в нескольких событиях, выбранных по записям интегрального потока радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц, полученных в Уссурийской астрофизической обсерватории [12] (в настоящее время — ИПА РАН). В первом событии (15–16.11.2015) исследованы два “изолированных” отрицательных всплеска, в других (07–09.09.2017) рассмотрены депрессии разных типов, но более подробно изучены отрицательные всплески типа “поглощение перед всплеском”. В разделе 2 представлены результаты анализа наблюдений событий в различных спектральных диапазонах, а также оценка параметров поглощающего вещества для одного из событий. Раздел 3 посвящен обсуждению полученных результатов, в разделе 4 приведены основные результаты исследования.

Основными источниками информации являлись различные интернет-центры данных. Использованы записи интегральных потоков радиоизлучения радиополяриметров Нобеяма¹, станций Сети солнечных радиотелескопов RSTN BBC США². Для анализа наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне использовались изображения, полученные инструментом AIA солнечной космической обсерватории SDO³, в радиодиапазоне — изображения радиогелиографа Нобеяма⁴. Данные о корональных выбросах были взяты из каталога коронографа SOHO LASCO CME Catalog⁵.

2. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Событие 15/16.11.2015

Два “изолированных” отрицательных всплеска были зарегистрированы 15/16.11.2015 на записи интегрального потока радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц по данным Уссурийской обсерватории. Хотя начало наблюдений 15 ноября в 23:15 совпа-

ло с уже происходящей первой депрессией радиоизлучения, можно считать, что она относилась к типу “изолированный” отрицательный всплеск, поскольку вспышки по данным GOES SXR 1–8 Å до 23:00 отсутствовали.

Событие было связано с двумя эрупциями спокойных волокон в юго-западном квадранте солнечного диска, одна из которых была симпатической. Первое крупное эруптивное волокно находилось между активными областями NOAA 12452 (S08, W13) и 12449 (S11, W49) магнитного класса β с небольшими пятнами. Подъем и расширение волокна наблюдались с 21:30 как в линии H α (например, на изображениях, полученных в MLSO), так и в крайнем ультрафиолете на изображениях SDO/AIA. Возможными причинами эрупции считаются появление и аннигиляция областей магнитного поля противоположной полярности, которые происходили в нескольких местах вдоль нейтральной линии магнитного поля [13, 14]. Эрупция сопровождалась всплещно подобными лентами, видимыми в крайнем ультрафиолете, и замедляющимся корональным выбросом массы (КВМ).

Изображения SDO/AIA в канале 304 Å (максимальная температурная чувствительность 80000 К) показали разогрев плазмы волокна в начале эрупции в местах отрыва его ножек, и затенение его веществом обширных областей спокойного Солнца и активных областей, расположенных к северу и к западу от его начального положения (рис. 1). Анализ изображений радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц подтвердил, что во время своего подъема и расширения волокно затеняло излучение двух тепловых радиоисточников, расположенных над активными областями NOAA 12453 и 12449. Их положение показано белыми контурами на рис. 1.

Рисунок 2 представляет измеренные по радиоизображениям на 17 ГГц величины потока от этих источников в единицах с.е.п. (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м² Гц)). При расчете этих величин производилось вычитание яркостной температуры спокойного Солнца в пределах площади радиоисточника. На рис. 2 также приведена запись интегрального потока радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц по данным Уссурийской обсерватории. Видно, что изолированный отрицательный всплеск на записи интегрального радиопотока совпадает по времени с уменьшением потока от источников. Подобная депрессия радиоизлучения обычно происходит и на других частотах микроволнового диапазона, однако эти данные (например, сети радиотелескопов RSTN) в сети Интернет найти не удалось. Наблюдения же радиополяриметров Нобеяма начались только с 00:00 16 ноября.

¹ <ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/xdr/>

² ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/RSTN_1sec/

³ <http://jsoc.stanford.edu/data/aia/synoptic/>

⁴ <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/images/10min/>

⁵ http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

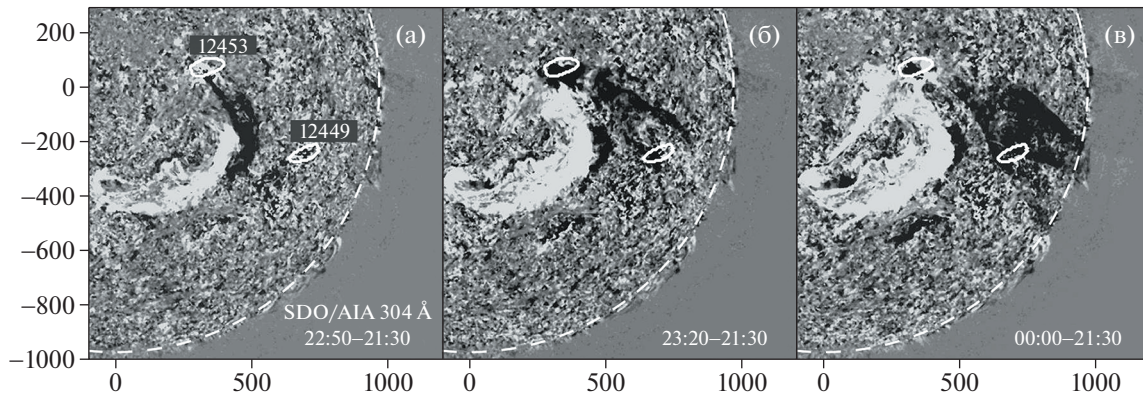


Рис. 1. Эрупция волокна 15.11.2015 на разностных изображениях SDO/AIA в канале 304 Å. Контурами показано положение радиоисточников над активными областями, определенное по изображениям радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц. На координатных осях здесь и далее отложены угловые секунды от центра солнечного диска.

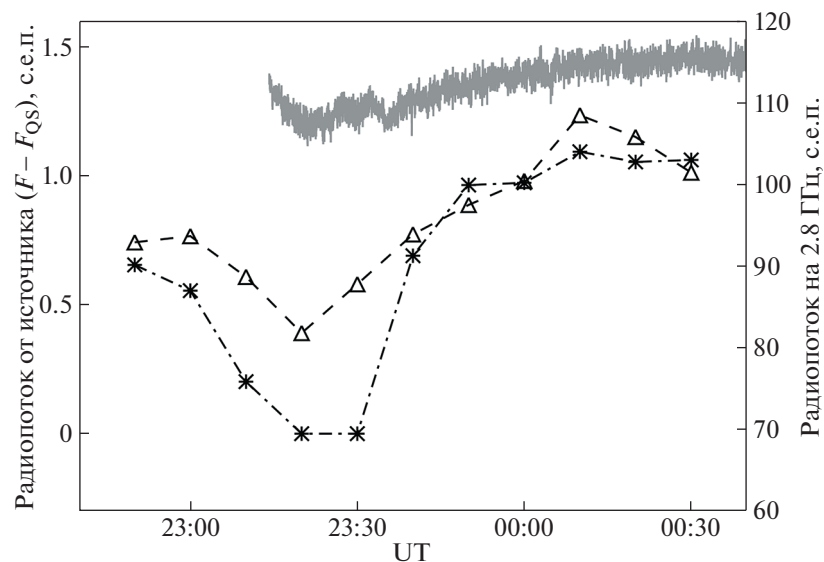


Рис. 2. Измеренные 15/16.11.2015 по изображениям радиогелиографа Нобеяма на 17 ГГц величины потока от радиоисточников над активными областями NOAA 12453 (звездочки) и 12449 (треугольники). Сплошной серой линией показана запись интегрального потока радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц.

Похожие события с депрессиями радиоизлучения, наблюдавшимися на ряде частот микроволнового диапазона, изучались нами ранее [5, 3, 6]. По аналогии с полученными в них результатами мы делаем вывод, что причиной “изолированного” отрицательного всплеска в данном случае было поглощение радиоизлучения областей как спокойного Солнца, так и радиоисточников веществом эруптивного волокна. Это была эрупция крупного спокойного волокна, расположенного между двумя активными областями.

Второй “изолированный” отрицательный всплеск наблюдался на частотах микроволнового диапазона 2.8–9.4 ГГц по данным разных обсер-

ваторий. Использовались записи радиополяриметров Нобеяма, радиометра Уссурийска и спектрополяриметра ИСЗФ СО РАН в диапазоне частот 4–8 ГГц [15]. На рис. 3а представлены сглаженные по 3–20 с профили радиоизлучения с вычтенным предвсплесковым уровнем F_{before} , нормированные к уровню спокойного Солнца F_{QS} (о необходимости нормировки см. ниже). Величины F_{QS} на этих частотах были определены аппроксимацией измеренных значений для спокойного Солнца на ряде частот, полученных в работе [16]. Вертикальной штрихпунктирной линией показано максимальное поглощение в 02:24.

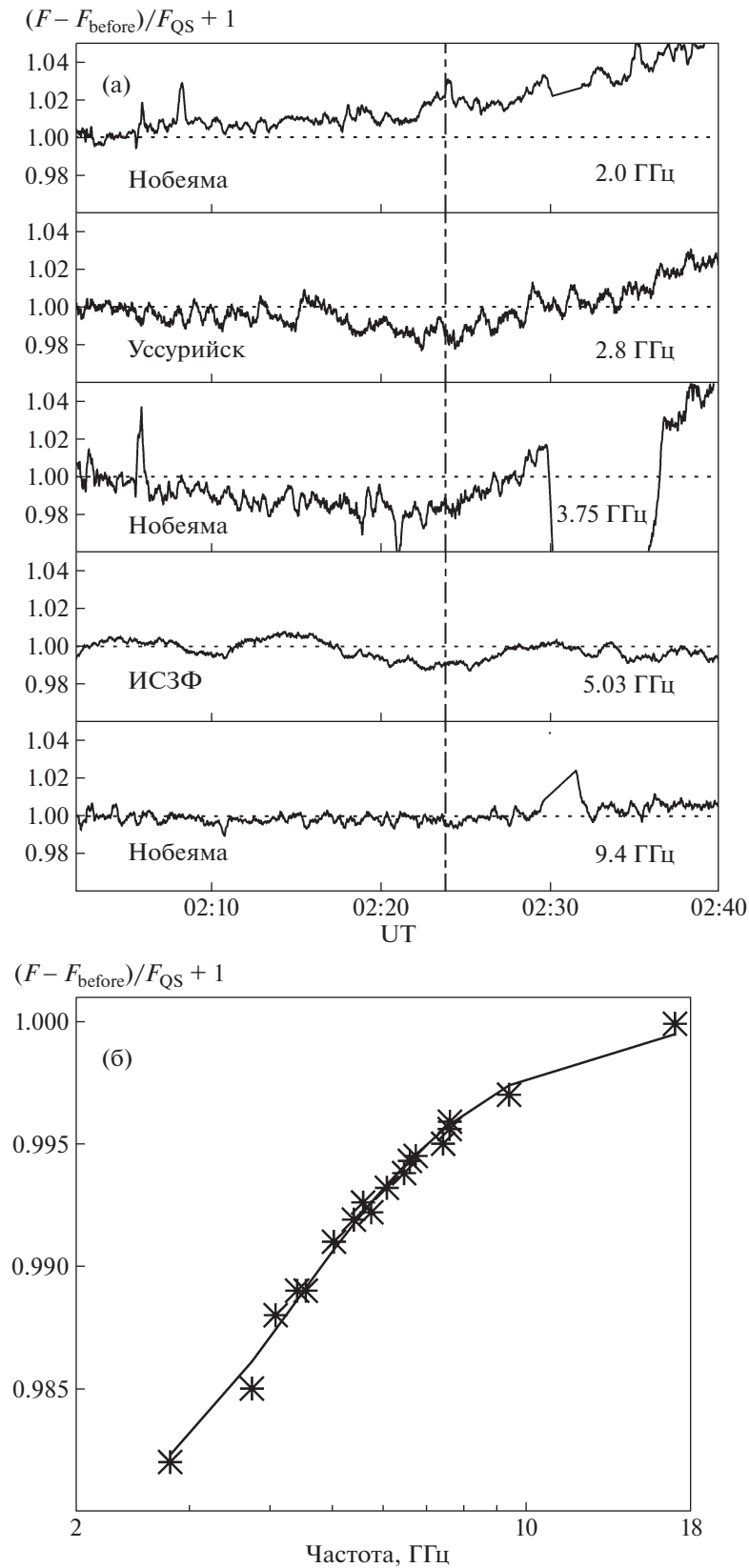


Рис. 3. Нормированные к уровню спокойного Солнца F_{QS} профили радиоизлучения на разных частотах с вычтенным предвсплесковым уровнем F_{before} (а). Вертикальной штрихпунктирной линией отмечена максимальная глубина поглощения, для которой были выполнены измерения; б — спектр глубины радиопоглощения в 02:24. Звездочки — измеренные значения, сплошная линия — модельная аппроксимация.

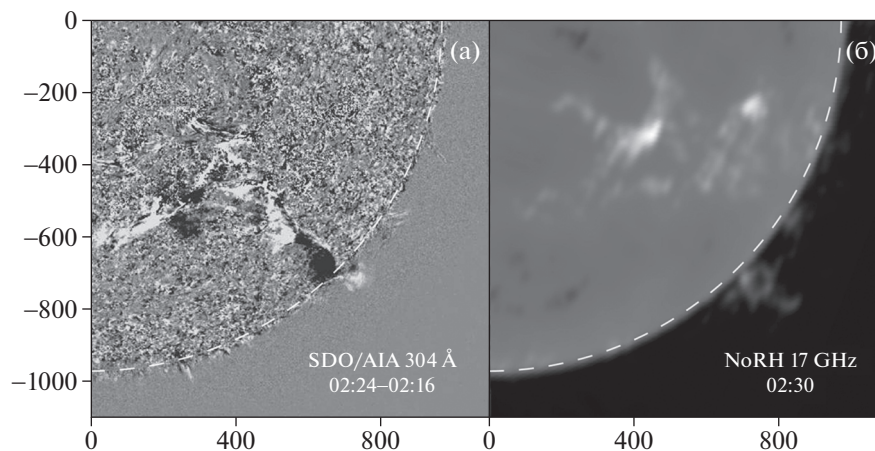


Рис. 4. Эруптивное волокно 16.11.2015: а — на разностном изображении SDO/AIA в канале 304 Å, б — на изображении радиогелиографа Нобейма на частоте 17 ГГц (над лимбом).

Во время второго отрицательного всплеска произошла частичная симпатическая эрупция другого спокойного волокна, которое находилось к юго-востоку от активных областей NOAA 12449 и 12450. Эрупция также привела к появлению вспышечно подобных лент, наблюдаемых в крайнем ультрафиолете, и быстрому KBM. Анализ изображений SDO/AIA в КУФ и изображений радиогелиографа Нобейма на частоте 17 ГГц показал, что во время своего подъема вещество волокна затеняло только области спокойного Солнца (рис. 4).

В работе [11] была предложена модель для оценки параметров поглощающего вещества по измеренным величинам радиопоглощения на разных частотах. Измерения проводились по нормированному к уровню спокойного Солнца профилю радиоизлучения, которые и показаны на рис. 3а. При расчетах параметры поглотителя подбирались таким образом, чтобы расчетные значения радиопоглощения были близки к измеренным величинам на разных частотах. Случай поглощения излучения только областей спокойного Солнца был наиболее простым. На рис. 3б звездочками показаны измеренные в 02:24 значения поглощения, сплошной линией — вычисленные с применением модели. Расчетная кривая получена при следующих параметрах поглощающего вещества: его кинетическая температура — 9000 К, оптическая толщина на частоте 17 ГГц — 0.08, высота нижней границы поглощающего экрана над хромосферой — 20 Мм, площадь экрана — 8% от площади солнечного диска. Дополнительное использование в данном случае данных спектрополяриметра ИСЗФ позволило уменьшить неопределенность хода расчетной кривой в диапазоне частот 4–8 ГГц. Используя значения оцененных параметров и методику, описанную

в [11], мы также получили оценку массы поглотителя — 3.3×10^{15} г. Полученные параметры поглощающего вещества подтверждают, что причиной второго “изолированного” отрицательного всплеска в событии 15/16.11.2015 было поглощение радиоизлучения только областей спокойного Солнца низкотемпературным веществом эруптивного волокна.

Таким образом, анализ наблюдений в различных спектральных диапазонах показал, что причиной двух “изолированных” отрицательных всплесков в событии 15/16.11.2015 было поглощение радиоизлучения в холодном веществе крупных волокон во время их эрупции. В первом случае происходило затенение как областей спокойного Солнца, так и соседних радиоисточников, во втором поглощалось радиоизлучение областей только спокойного Солнца.

2.2. События 07–09.09.2017

Два отрицательных всплеска типа “поглощение перед всплеском” были выявлены 08–09.09.2017 по записям радиоизлучения на частоте 2.8 ГГц в Уссурийской обсерватории. Они также наблюдались и на других частотах в нескольких обсерваториях, что подтверждает их солнечное происхождение. Третья депрессия радиоизлучения, зарегистрированная за пределами временного интервала наблюдений в Уссурийске, была изучена в [7].

На рис. 5 представлены сглаженные записи радиоизлучения по данным разных обсерваторий с вычтенным значением уровня излучения перед всплеском F_{before} . Запись со станции Лермонт на частоте 8.8 ГГц в связи с большой нестабильностью была заменена на запись другой станции сети радиотелескопов RSTN–Сан Вито, где наблю-

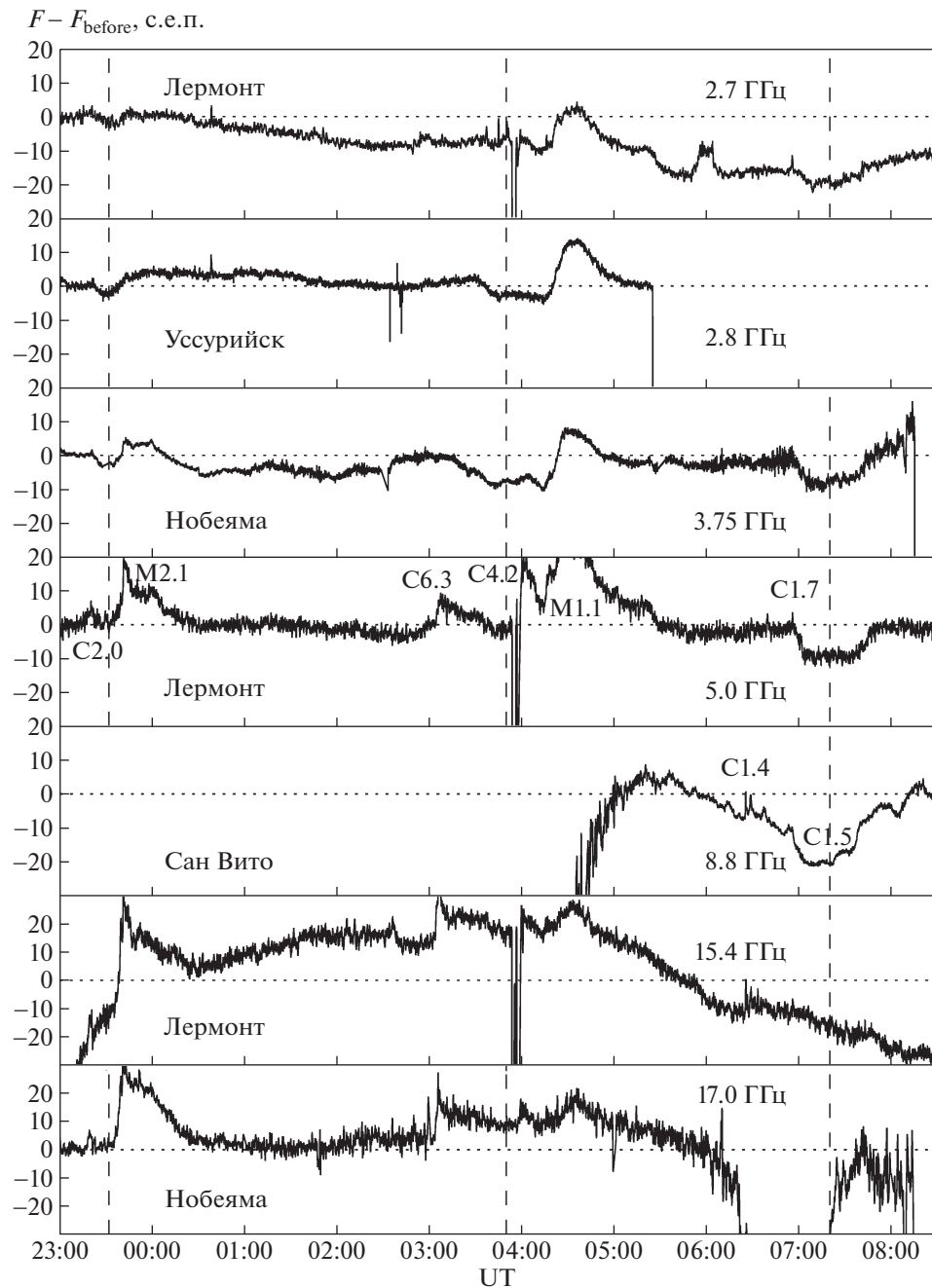


Рис. 5. Профили радиоизлучения 08/09.09.2017 на разных частотах с вычтенным предвсплесковым уровнем F_{before} . Вертикальными штриховыми линиями отмечены три депрессии радиоизлучения.

дения только начались. Три момента времени, отмеченные на рис. 5 вертикальными штриховыми линиями, относятся к депрессиям радиоизлучения. На панелях с записями радиопотока на 5.0 и 8.8 ГГц рядом с радиовсплесками приведены классы соответствующих им вспышек по данным GOES SXR 1–8 Å. Все вспышки произошли в активной области NOAA 12673, которая 09.09.2017 находилась вблизи солнечного лимба (ее коорди-

наты S09, W82). В процессе своего развития с 1 по 5 сентября 2017 г. она изменила магнитную конфигурацию с α на $\beta\gamma\delta$ и после прохождения центрального меридиана Солнца показывала высокую активность в виде множества вспышек, в том числе класса X. На рис. 5 видно, что вспышки класса M имели отклики в виде радиовсплесков на всех частотах, тогда как более слабым вспышкам соответствовали всплески только на высоких

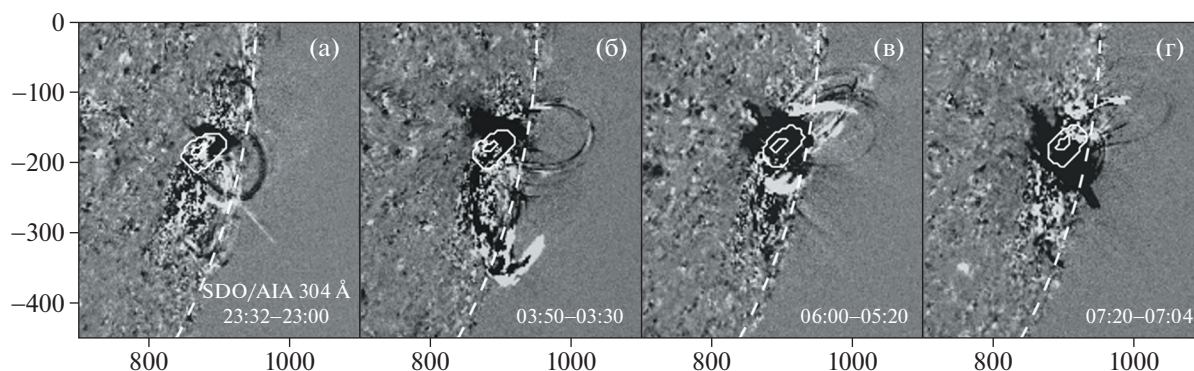


Рис. 6. Разностные изображения части солнечного диска 08/09.09.2017 по данным SDO/AIA в канале 304 Å. Белым контуром показано положение радиоисточника на уровне интенсивности [0.5; 0.9] от максимальной, определенное по изображениям радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц, штриховой дугой — лимб Солнца.

частотах. В связи с этим существует неопределенность с типом третьего отрицательного всплеска, его можно отнести как к типу “изолированный”, так и к типу “поглощение после всплеска”.

Как было показано в [7], причиной этой наиболее глубокой депрессии на всех частотах (после 07:00) явилось экранирование микроволновых источников над солнечными пятнами веществом небольшого эруптивного волокна, наблюдавшегося в виде джета. Анализ оригинальных изобра-

жений SDO/AIA в канале 304 Å показал, что во время двух других отрицательных всплесков в активной области или вблизи нее также наблюдались джеты. Рисунок 6 представляет разностные изображения части солнечного диска в канале 304 Å в моменты времени, отмеченные на рис. 5 вертикальными штриховыми линиями, а также в 06:00. Положение радиоисточника, определенное по изображениям радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц 8 сентября в 23:00 на уровнях ин-

Таблица 1. Сведения об отрицательных всплесках, отождествленных с событиями в крайнем ультрафиолете

№	Дата, время наблюдения депрессии	Тип всплеска, частоты наблюдений, ГГц (обсерватория)	События в КУФ и белом свете	Класс вспышки (время начала)
1	07.09.2017, 08:35–09:30	Изолированный, с наложением на него всплеска, 2.7–8.8 (Сан Вито)	Два джета 08:37–09:00 и 09:02–09:41	C2.3 (09:16)
2	07.09.2017, 10:22–11:20	Депрессия после всплеска, 2.7–8.8 (Сан Вито)	Эрупция волокна (в виде джета) и КВМ	M7.3 (10:11)
3	08.09.2017, 01:00–02:00	Изолированный, с наложением на него всплеска, 2–7.5 (Нобеяма, УАФО, Лермонт, корреляционные кривые СРГ)	Активизация и частичная эрупция волокна	C5.3 (01:36)
4	08.09.2017, 03:45–04:30	Депрессия после всплеска, 2.7–8.8 (Нобеяма, Лермонт, СРГ)	Джет (03:46–04:30)	M1.2 (03:39)
5	08.09.2017, 06:10–07:10	Депрессия после всплеска, 2.7–8.8 (Нобеяма, Лермонт, Сан Вито, СРГ)	Джет (06:10–07:05)	C8.3 (05:31)
6	08.09.2017, 10:50–11:20	Депрессия перед всплеском, 1.4158.8 (Сан Вито)	Активизация волокна (до 11:00) и джет (11:00–11:40)	C1.6 (10:45) C1.7(11:21)
7	08.09.2017, 12:10–12:50	Депрессия после всплеска, 2.7–8.8 (Сан Вито)	Джет (12:18–12:55)	C5.9 (12:09)
8	08.09.2017, 13:20–13:40	Изолированный, 2.7–15.4 (Сан Вито)	Активизация волокна	Нет вспышек
9	08.09.2017, 12:10–12:50	Депрессия перед всплеском, 5–15.4 (Сан Вито)	Джеты друг за другом	M2.9 (15:09)

тенсивности 0.5 и 0.9 от максимума, показано контуром на рис. 6 с учетом вращения Солнца на указанное на панелях время.

Джет 8 сентября (рис. 6а) наблюдался на изображениях в канале 304 Å 23:08. Его вещество частично экранировало микроволновый источник. После второго джета (рис. 6б), по данным каталога SOHO/LASCO 9 сентября в 06:12 был зарегистрирован замедляющийся KBM, не имеющий явно выраженного ядра. На частотах ≥ 5 ГГц заметно понижение уровня интегрального радиопотока (рис. 5), но за счет вспышечного излучения отрицательные всплески на этих частотах отсутствуют.

Отметим, что после 05:40 на изображениях SDO/AIA в 304 Å (рис. 6в) и на оригинальных изображениях радиогелиографа Нобейма наблюдалась активизация волокна. Вероятно, при подъеме его вещества на небольшую высоту происходило частичное затенение наиболее яркой части радиоисточника, что проявилось в понижении уровня радиоизлучения только на частотах >5 ГГц (рис. 5). Направление движения третьего джета и его размеры были такими (рис. 6г), что его вещество экранировало большую часть радиоисточника. Это привело к депрессии радиоизлучения на всех частотах от 2.7 до 17 ГГц.

Оценки параметров поглощающего вещества с использованием модели для этого события не проводились, поскольку в модели учитывается затенение источника теплового тормозного излучения. При изучении же депрессии радиоизлучения после 07:00 в работе [7] отмечалось, что вещество джета экранировало один или несколько поляризованных источников, связанных с солнечными пятнами, поскольку снижение интенсивности имело аналог в изменении поляризации радиоизлучения на частотах 4–8 ГГц. Кроме того, в работе [17] было показано, что с 05.09.2017 основным компонентом квазистационарного излучения активной области NOAA 12673 на частоте 17 ГГц являлся компактный источник над нейтральной линией, чья яркостная температура может быть выше, чем у обычных гирорезонансных источников.

Отметим, что с 07.09.2017 при приближении к западному лимбу в активной области или немного к востоку от нее в канале 304 Å регистрировались многочисленные джеты. После определения времени их наблюдений было установлено, что большинство из них можно отождествить с депрессиями радиоизлучения на частотах диапазона 1–17 ГГц. Сведения о таких отрицательных всплесках, обнаруженных по данным разных обсерваторий, а также о вспышках, происходящих в эти интервалы времени, приведены в табл. 1.

За 2 дня (7 и 8 сентября) было выявлено еще 9 отрицательных всплесков. Вероятно, их могло

быть и больше, но некоторые из джетов (например, 8 сентября в 05:54 и 08:57) наблюдались во время мощных вспышек, на фоне которых депрессии радиоизлучения обычно не заметны. Кроме того, 5 джетов, наблюдаемые 7 и 8 сентября с 17:00 до 22:00, произошли во время отсутствия наблюдений в радиодиапазоне (данных станции Сагамор Хилл, где проводятся наблюдения в этот период времени, на сайте RSTN нет). Поскольку время существования джетов составляло десятки минут, то в случае, если они наблюдались непосредственно друг за другом, депрессия радиоизлучения могла быть одна (например, № 1 и 9 в табл. 1).

Таким образом, анализ изображений в различных спектральных диапазонах показал, что вещество джетов, периодически возникающих 07–09.09.2017 в или вблизи активной области, имеющей сложную магнитную конфигурацию и приближающейся к солнечному лимбу, частично затеняло находящиеся в ней радиоисточники (один или несколько), что привело к многочисленным депрессиям радиоизлучения на ряде частот микроволнового диапазона.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное нами исследование событий с отрицательными всплесками разного типа с использованием данных различных спектральных диапазонов подтвердило сделанные ранее выводы о причинах депрессий радиоизлучения. Тем не менее каждое событие являлось уникальным и имело свои особенности. В событии 15.11.2015 эрупция крупного волокна с первого взгляда была похожа на аномальную [18], когда вещество эруптивного волокна в процессе эрупции не сохраняет свою форму и магнитную структуру, а рассеивается по большой площади. Однако более детальный анализ наблюдений показал, что форма волокна при расширении не изменялась. Видимое движение плазмы в разных направлениях обусловлено частичным стеканием ее обратно на солнечную поверхность вдоль главной оси волокна одновременно с продолжающимся расширением волокна вверх.

Для второй эрупции (16.11.2015) применение модельных расчетов позволило оценить площадь поглощающего облака в микроволновом диапазоне, которая составила $\approx 8\%$ от площади солнечного диска. Эта величина близка к оценке 10%, полученной в работе [6], где изолированный отрицательный всплеск также наблюдался в результате поглощения веществом крупного эруптивного волокна областей только спокойного Солнца. В других же исследованиях [3, 5], где причиной депрессии радиоизлучения было экранирование как областей спокойного Солнца, так

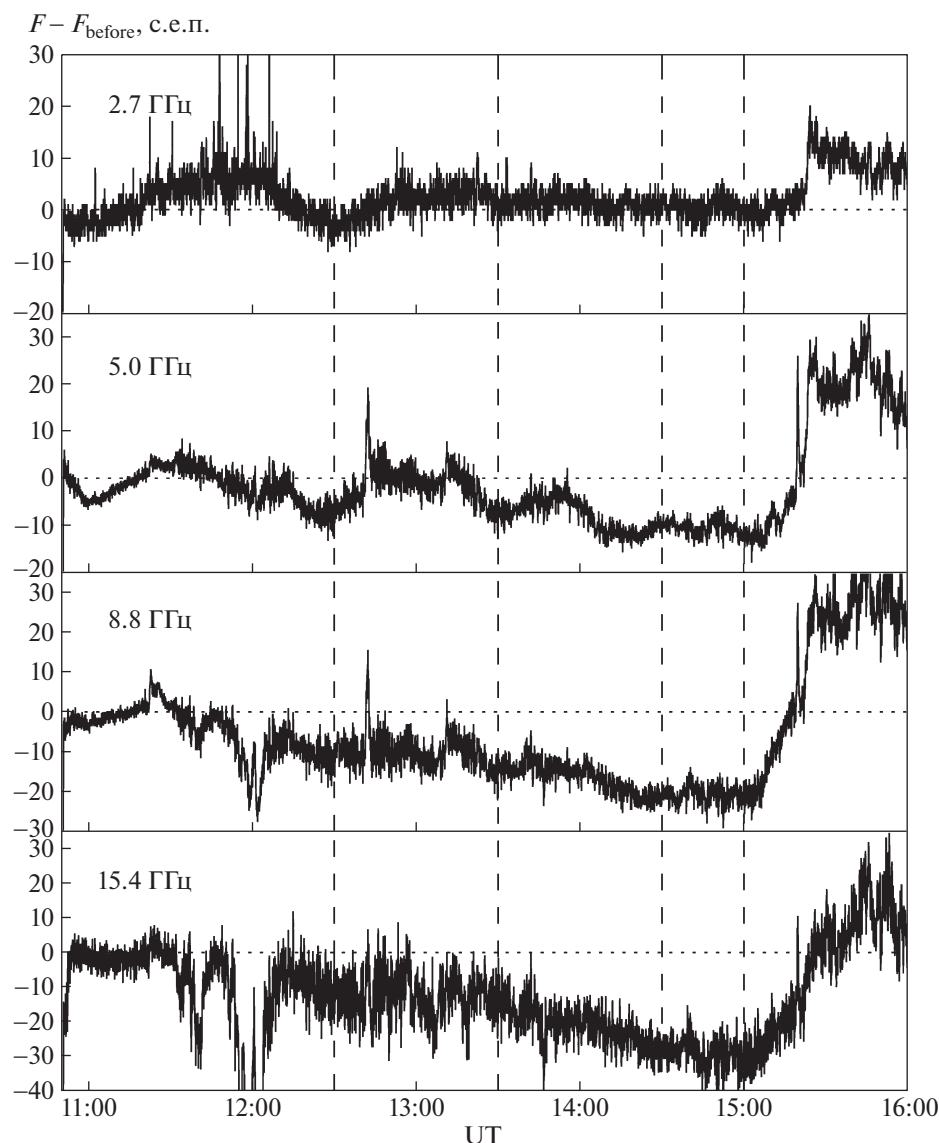


Рис. 7. Профили радиоизлучения 08.09.2017 на разных частотах с вычтенным предвсплесковым уровнем F_{before} по данным Сан Вито. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты времени, которым соответствуют изображения на рис. 8.

и радиоисточника, эта площадь составляла 2–6% от площади солнечного диска. Оцененная температура вещества эруптивного волокна (9000 K) и его масса (3.3×10^{15} г) согласуются с оценками температур и масс крупных протуберанцев, а также с массами KBM, полученными в других событиях [3]. В каталоге SOHO LASCO CME Catalog масса KBM оценена в 1.7×10^{16} г, но отмечалась неточность этой оценки в связи с тем, что движение выброса происходило в плоскости, отличной от картинной плоскости SOHO.

О событиях с отрицательными всплесками, причиной которых являлось затенение около-

лимбовых радиоисточников веществом джетов, уже сообщалось в работах [7, 8]. Похожая картина наблюдалась и 07–09.09.2017. Отметим, что все джеты так или иначе были связаны со вспышками. Тип отрицательного всплеска зависел от класса вспышки, предшествующей джету или следующей за ним. Депрессия радиоизлучения могла быть даже “изолированным” отрицательным всплеском в случае невысокого класса вспышки и расположения активной области вблизи солнечного лимба (как, например, третий отрицательный всплеск в событии 08–09.09.2017 или депрессии радиоизлучения, изученные в [8]). Хотя, как правило, такой всплеск наблюдается в

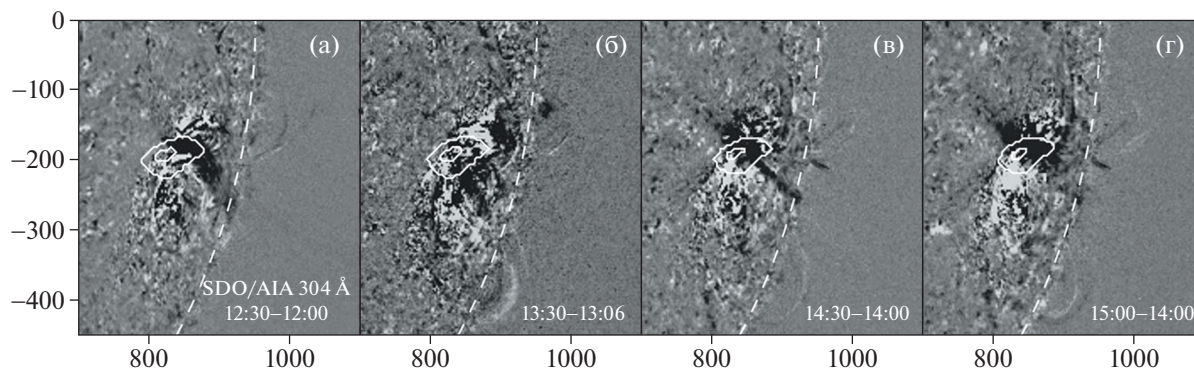


Рис. 8. Разностные изображения части солнечного диска 08.09.2017 по данным SDO/AIA в канале 304 Å. Белым контуром показано положение радиоисточника на уровне интенсивности [0.5; 0.9] от максимальной, определенное по изображениям радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц 07.09.2017 в 23:00 с учетом вращения Солнца на указанное на панелях время. Штриховой дугой отмечен солнечный лимб.

отсутствие каких-либо вспышек, как в событии 15/16.11.2015.

Ранее отмечалось, что отрицательные всплески в микроволновом диапазоне довольно редкое явление. 12 депрессий радиоизлучения, наблюдаемые в течение всего трех суток в сентябре 2017 г., показывают, что они могут происходить довольно часто в развивающейся активной области при расположении ее вблизи солнечного лимба. В этом случае причиной депрессий может быть активизация волокна или джеты, наблюдающиеся между наблюдателем и активной областью, и частично затеняющие находящиеся в ней радиоисточники.

В [18] отмечалось, что при поглощении теплового радиоизлучения низкотемпературным ($\sim 10^4$ K) веществом экрана для наблюдения отрицательных всплесков наиболее предпочтителен диапазон частот < 5 ГГц. На более высоких частотах обычно наблюдалось снижение уровня излучения, но не ниже предвсплескового.

Интересен случай, когда депрессия радиоизлучения присутствует на высоких частотах, но мало проявлена на низких (например, № 8 и 9 в табл. 1). На рис. 7 приведены записи интегрального радиопотока 08.09.2017, полученные на разных частотах в Сан Вито. Отрицательные всплески в 11:00, 12:30 и 13:30 видны на всех частотах, тогда как “депрессия перед всплеском” после 14:00 зарегистрирована только на частотах ≥ 5 ГГц. Отметим, что в этом интервале времени в канале 304 Å друг за другом наблюдались джеты (рис. 8в, г), хотя нельзя исключать и нестабильность в работе приемной аппаратуры, что могло проявиться в постепенном падении потока радиоизлучения после 12:00 на частотах ≥ 5 ГГц.

В чем же отличие джетов, наблюдаемых между 14:00 и 15:10, от других? На рис. 8б–г видно, что на-

правление движения джетов таково, что их вещество затеняло наиболее яркую часть радиоисточника, в отличие от джетов на рис. 8а и рис. 8а, б. Отметим, что и изображения на рис. 8в, г показывают экранирование наиболее яркой части радиоисточника, что соответствует снижению уровня радиопотока на частотах > 5 ГГц на рис. 5.

На высоких частотах радиоисточники обычно располагаются над пятнами или между ними, тогда как на низких частотах они имеют большие размеры (типа гало). Если вещество джета экранирует гирорезонансный радиоисточник (или источник над нейтральной линией) на высоких частотах, тогда можно ожидать, что отрицательный всплеск на этих частотах будет иметь большую глубину. Однако при этом площадь поглощающего вещества может быть недостаточна для появления заметной депрессии радиоизлучения на низких частотах, когда площадь поглотителя мала по сравнению с размером радиоисточника.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование событий, в которых на разных частотах микроволнового диапазона наблюдались отрицательные всплески разных типов. В событии 15–16.11.2015 оба радиовсплеска имели редкий тип “изолированный” и были связаны с эрупциями крупных спокойных волокон, расположенных между активными областями в южном полушарии вблизи центрального меридиана Солнца. Детальный анализ наблюдений в различных спектральных диапазонах показал, что причиной их возникновения было поглощение веществом эруптивного волокна излучения областей спокойного Солнца и соседних радиоисточников (15.11.2015) и только областей спокойного Солнца (16.11.2015). Сделанные оценки парамет-

ров поглощающего вещества 16.11.2015 подтвердили этот вывод.

Для двух отрицательных всплесков типа “депрессия перед всплеском” в событии 08–09.09.2017 показано, что они были связаны с появлением джетов в активной области или к востоку от нее. Активная область имела сложную магнитную конфигурацию и располагалась вблизи западного лимба Солнца. Вещество джетов частично затеняло находящиеся в ней радиоисточники (скорее всего, гирорезонансные), что и вызвало отрицательные всплески на ряде частот микроволнового диапазона.

При сопоставлении наблюдений в крайнем ультрафиолете и радиодиапазоне 07–09.09.2017 выявлено, что появление джетов в большинстве случаев соответствовало депрессиям радиоизлучения. В течение трех суток на разных обсерваториях было зарегистрировано, как минимум, 12 отрицательных всплесков. Это показывает, что такие события могут быть не такими редкими, как считалось ранее. Тип всплеска зависел от класса вспышки и мог быть даже “изолированным” из-за положения активной области вблизи лимба, когда слабые вспышки присутствовали, но не имели отклика в радиодиапазоне. Рассмотрен пример возникновения более глубокой депрессии радиоизлучения на высоких частотах по сравнению с низкими частотами, о чем ранее не сообщалось.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен коллегам из отдела радиофизики ИСЗФ СО РАН: к.ф.-м.н. Д.А. Жданову за любезно предоставленные данные спектрополяриметра в диапазоне частот 4–8 ГГц, д.ф.-м.н. А.М. Уралову за полезные замечания и обсуждение некоторых моментов, д.ф.-м.н. В.В. Гречневу за возможность использования программ из его IDL-библиотек. Автор признателен за свободный доступ к данным NASA/SDO и научному коллективу AIA, а также коллективам, ведущим наблюдения на радиотелескопах сети USAF RSTN BBC США и спутниках GOES; коллективу, поддерживающему каталог SOHO LASCO CME в центре данных CDAW НАСА и Американского Католического университета в кооперации с Военно-морской исследовательской лабораторией США. Мы также благодарим

Международный консорциум, обеспечивший продолжение наблюдений на Радиогелиографе Нобеяма до их прекращения 31 марта 2020 г. Радиополяриметры Нобеяма (NoRP) эксплуатируются Солнечной научной обсерваторией (Solar Science Observatory) — отделением Национальной астрономической обсерватории Японии. Данные наблюдений NoRP проверены консорциумом, обеспечивающим функционирование NoRP в научных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. E. Covington, *Solar-Geophys. Data* **358**, 20 (1974).
2. A. E. Covington, *Solar Phys.* **33**, 439 (1973).
3. V. Grechnev, I. Kuzmenko, A. Uralov, I. Chertok, and A. Kochanov, *Publ. Astron. Soc. Japan* **P65**, id. SP10 (2013).
4. C. Sawyer, *Solar Phys.* **51**, 203 (1977).
5. И. В. Кузьменко, В. В. Гречнев, А. М. Уралов, *Астрон. журн.* **86**, 1114 (2009).
6. I. V. Kuzmenko and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **292**, 143 (2017).
7. V. V. Grechnev, S. V. Lesovoi, A. A. Kochanov, A. M. Uralov, *et al.*, *J. Atmospher. Solar-Terr. Phys.* **174**, 46 (2018).
8. И. В. Кузьменко, *Солнечно-земная физика* **6**, 26 (2020).
9. V. P. Maksimov and V. P. Nefedev, *Solar Phys.* **136**, 335 (1991).
10. А. Ю. Федотова, А. Т. Алтынцев, А. А. Кочанов, С. В. Лесовой, Н. С. Мешалкина, *Солнечно-земная физика* **4**, 17 (2018).
11. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. A. Slemzin, I. M. Chertok, I. V. Kuzmenko, and K. Shibasaki, *Solar Phys.* **253**, 263 (2008).
12. И. В. Кузьменко, Ф. А. Михалина, Б. А. Капустин, *Изв. Вузов. Радиофизика* **LI**, 1005 (2008).
13. Y. Hou, T. Li, Z. Song, and J. Zhang, *Astron. and Astrophys.* **640**, id. A101 (2020).
14. Z. Song, Y. Hou, and J. Zhang, **892**, id. 79 (2020).
15. D. A. Zhdanov and V. G. Zandanov, *Central European Astrophys. Bull.* **35**, 223 (2011).
16. V. N. Borovik, *Lectures Notes in Physics* **432**, 185 (1994).
17. А. В. Кудрявцева, И. И. Мышьяков, А. М. Уралов, В. В. Гречнев, *Солнечно-земная физика* **7**, 3 (2021).
18. В. В. Гречнев, И. В. Кузьменко, И. М. Черток, А. М. Уралов, *Астрон. журн.* **88**, 692 (2011).