

И.В. Кузьменко, В.В. Гречнев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЙ С РАЗНЫМИ СЦЕНАРИЯМИ РАЗВИТИЯ

Исследованы два события, в которых произошли эрупции волокон в юго-западном квадранте солнечного диска. На ряде частот микроволнового диапазона при этом наблюдались отрицательные всплески разных типов: 07.06.2011 г. – послевсплесковое уменьшение радиопотока, 13.12.2011 г. – изолированный отрицательный радиовсплеск. Анализ наблюдений в различных спектральных диапазонах показал, что в событии 13.12.2011 произошла эрупция волокна вне активной области. При расширении волокно наблюдалось как движущееся потемнение в канале 304 \AA и на изображениях радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц, которое закрывало радиоисточники, расположенные северо-западнее. Событие 07.06.2011 г. являлось ярким примером аномальной эрупции волокна. Поглощающие фрагменты были хорошо видны на изображениях SDO/AIA не только в канале 304 \AA , но и в корональных каналах, чего прежде не наблюдалось. Вещество эруптивного волокна в виде огромного облака разлетелось над солнечной поверхностью и частично вернулось обратно.

По наблюдаемым величинам радиопоглощения в обоих событиях выполнены оценки таких параметров поглощающего вещества, как его кинетическая температура, площадь, оптическая толщина и высота над хромосферой. Массы поглотителя оказались близки к характерной массе волокна. Свойства событий с аномальными эрупциями, выявленные ранее, в основном подтверждаются.

ВВЕДЕНИЕ

В эруптивных событиях, происходящих на фоне солнечного диска, иногда регистрируются отрицательные радиовсплески в микроволновом диапазоне, представляющие собой временное изменение – падение интегрального потока ниже квазистационарного уровня ра-

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

диоизлучения до и после всплесков. Такие всплески были обнаружены А.Э. Ковингтоном в 1951 г. и интерпретированы им как результат поглощения радиоизлучения в веществе эруптивного протуберанца [4]. Более поздние исследования [3, 6] подтвердили эту интерпретацию и привели к сценарию затенения микроволнового радиоисточника облаком холодного поглощающего вещества.

Исследования событий с отрицательными всплесками, выполненные нами по данным различных спектральных диапазонов [1, 2, 5], позволили получить о них новую информацию. Установлено, что причиной отрицательных всплесков являлось поглощение веществом эруптивного волокна излучения не только локальных радиоисточников, но и обширных площадей спокойного Солнца. В событиях с отрицательными всплесками могут наблюдаться обширные потемнения в линии He II 304 Å, по форме и положению отличающиеся от диммингов в корональных каналах [1, 2]. Показано, что депрессия излучения в 304 Å может возникать в результате поглощения фонового излучения Солнца облаком холодной водородно-гелиевой плазмы.

Выявлены два сценария экранирования солнечного излучения эруптивным волокном. В большинстве случаев его форма и магнитная структура не претерпевают существенных изменений. Такое волокно, уходя от солнечной поверхности, расширяется и выглядит как движущийся экран, размеры которого растут, а непрозрачность падает. В отдельных событиях эрупции могут иметь аномальный характер: эруптивное волокно существенно изменяет форму, а часть его вещества может разбрасываться по обширной солнечной поверхности и оседать вдали от области эрупции. Примером такого сценария является исследованное раннее событие 13.07.2004 г. [5].

Аномальные эрупции мало изучены по очевидным причинам. Рассеиваемое по большой площади вещество быстро становится невидимым в Na из-за потери оптической толщины и выхода из полосы фильтра за счет эффекта Доплера. Изображения же в канале 304 Å, как правило, получались на телескопе SOHO/EIT с интервалом в 6 ч, вследствие чего вероятность регистрации таких явлений была низкой. По результатам анализа эпизодических наблюдений были описаны их свойства [1], для подтверждения которых необходимы дальнейшие исследования. Более детальные наблюдения в крайнем ультра-

фиолетовом диапазоне, ведущиеся на космических аппаратах SDO и STEREO, открывают новые перспективы в изучении таких событий.

В работе по данным различных диапазонов спектра проведено исследование двух эруптивных событий, произошедших в юго-западном квадранте солнечного диска и имеющих разные сценарии развития. Основными источниками информации для работы являлись различные Интернет-центры данных. Для анализа наблюдений использовались изображения, полученные радиогелиографом Нобейма на частоте 17 ГГц (<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/10min>) и телескопами SDO/AIA (<http://jsoc.stanford.edu/data/aia/synoptic/>) и STEREO/EUVI в канале 304 Å (http://sharpp.nrl.navy.mil/cgi-bin/swdbi/secchi_flight/img_short/form). Данные о корональных выбросах взяты из каталога коронографа SOHO LASCO CME Catalog (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Использованы записи интегральных потоков радиоизлучения с радиополяриметров Нобейма (<ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/xdr/>) и станции Лермонт Сети солнечных радиотелескопов RSTN BBC США (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/RSTN_1sec/), а также с радиометра на частоте 2,8 ГГц Уссурийской обсерватории.

СОБЫТИЕ 13.12.2011

В событии 13.12.2011 г. в микроволновом диапазоне был зарегистрирован изолированный отрицательный всплеск с максимальной глубиной поглощения и максимальной длительностью на частоте 2 ГГц. На рис. 1 показаны временные профили интегральных потоков радиоизлучения на ряде частот. Уровни радиопотоков до всплеска вычтены, записи сглажены за 30 с и нормированы к уровню спокойного Солнца.

Как показывает анализ наблюдений в радиодиапазоне и крайнем ультрафиолете, в событии произошла эрупция волокна вне активной области по первому сценарию. При своем расширении волокно наблюдалось как движущееся потемнение на изображениях радиогелиографа Нобейма на 17 ГГц и в канале 304 Å (рис. 2а, б), которое закрывало радиоисточники, расположенные северо-западнее в активных областях NOAA 11370 (S24, W87) и 11367 (S18, W89). Это про-

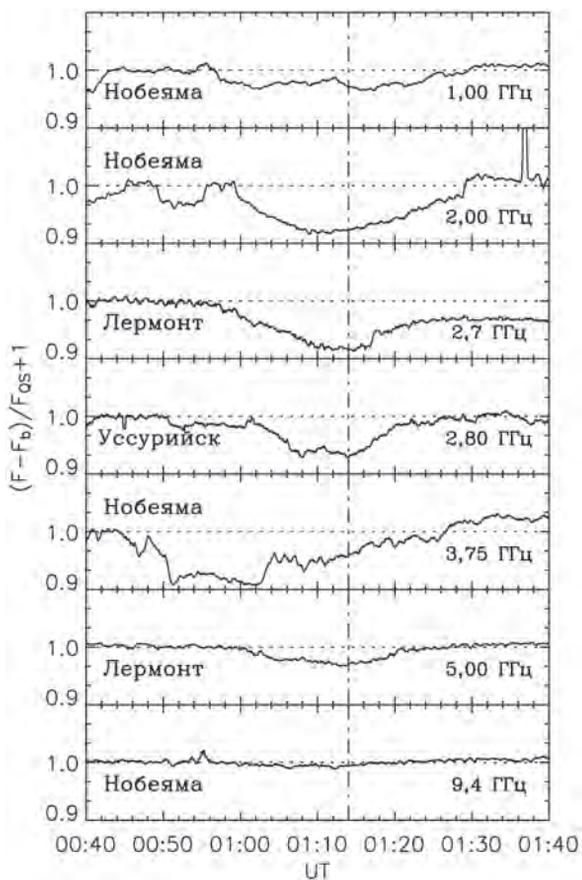


Рис. 1. Профили радиоизлучения, нормированные к уровню спокойного Солнца, в событии 13.12.2011 г. Штрихпунктирной линией отмечен момент максимального радиопоглощения, для которого выполнены измерения

исходило в интервале времени 01:00–01:20 UT, когда наблюдался отрицательный радиовсплеск.

Положение радиоисточников, определенное по радиоизображению на 17 ГГц в 01:10, показано белым контуром на рис.2б. На разностном изображении Солнца по данным SDO в 01:10 площадь потемнения на уровне 20%-го снижения яркости составила $\approx 0,5\%$ от площади солнечного диска, максимальная глубина потемнения

$\approx 54\%$. По данным SOHO/LASCO в событии наблюдался замедляющийся корональный выброс массы (КВМ), имеющий обычную трехкомпонентную структуру (рис.2з).

Эрупция волокна в крайнем ультрафиолете также наблюдалась телескопом STEREO-A/EUVI, гелиоцентрический угол между Землей и космическим аппаратом составлял 110° . По изображению STEREO-A/EUVI в канале 304 \AA в 01:14 (рис. 2в) оценена геометрическая толщина L и высота эруптивного волокна z над активной областью в направлении, близком к направлению вдоль луча зрения земного наблюдателя: $L \approx 90 \text{ Мм}$, $z \approx 140 \text{ Мм}$.

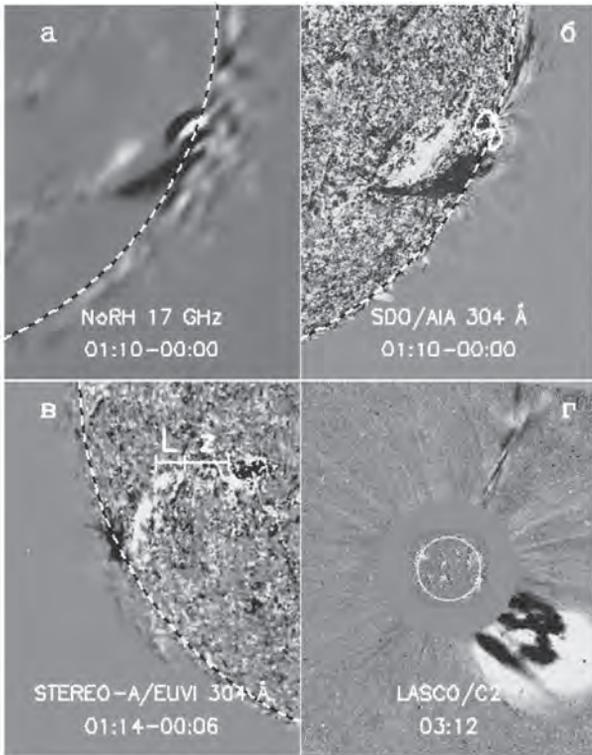


Рис. 2. Разностные изображения фрагмента Солнца в событии 13.12.2011 г. по данным радиогелиографа Нобейма 17 ГГц, SDO/AIA и STEREO-A/EUVI в канале 304 \AA (а-в), а также корональный выброс на разностном изображении SOHO/LASCO (г). Черно-белая пунктирная окружность – солнечный лимб

По наблюдаемым величинам радиопоглощения (рис. 1) с помощью разработанной ранее модели [2, 5] выполнены оценки параметров поглощающего вещества. Чтобы уменьшить число неизвестных задаваемых параметров, по изображению радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц был оценен радиопоток от источников во время отрицательного всплеска $\approx 3,5-4$ с.е.п. Как видно на рис. 1, из-за нестабильности в записи точность величин радиопоглощения на частотах 2,7 и 3,75 мала; интервал, в котором могут находиться эти величины, показан на рис. 3 пунктиром.

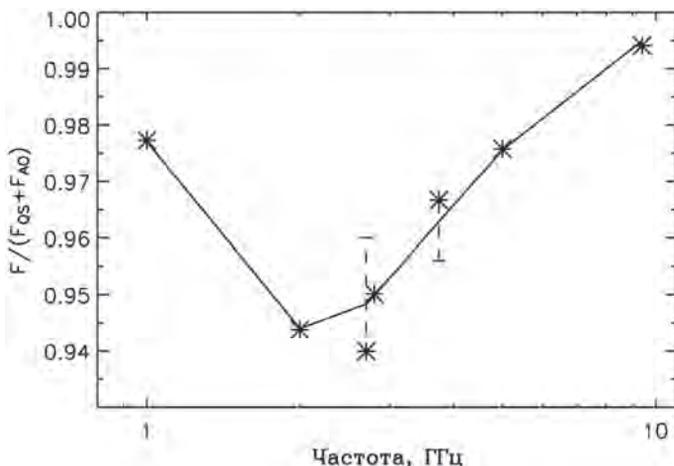


Рис. 3. Спектр глубины радиопоглощения в событии 13.12.2011 г. Значения поглощения нормированы к сумме радиопотоков от спокойного Солнца и радиоисточника. Звездочки – измеренные значения, сплошная линия – модельная аппроксимация. Пунктиром показан интервал возможных измеренных значений радиопоглощения на частотах 2,7 и 3,75 ГГц

Измеренные по рис. 1 относительные величины поглощения в момент максимальной депрессии на разных частотах были перенормированы к сумме радиопотоков от спокойного Солнца и затеняемых радиоисточников. На рис. 3 эти величины показаны звездочками, а расчетная кривая – сплошной линией. Она получена при следующих параметрах поглощающего вещества: кинетическая температура – $T = 10\,000 \pm 2000$ К, оптическая толщина на 17 ГГц $\tau_{17} = 0,1 \pm 0,05$, пло-

щадь облака по отношению к площади солнечного диска – $1,2 \pm 0,1\%$, его высота над хромосферой – $z = 110 \pm 30$ Мм, поток от затеняемого радиоисточника – $3,9$ с.е.п. Значения площади и высоты близки к величинам, оцененным по изображениям SDO и STEREO. Если принять геометрическую глубину облака $L \approx 50\text{--}100$ Мм, то масса поглотителя в 01:14 оценивается в $(2\text{--}3) \cdot 10^{14}$ г, что является типичной массой волокна.

Таким образом, в событии 13.12.2011 г. произошла эрупция волокна вне активной области, которая происходила по первому сценарию. Причиной изолированного отрицательного радиовсплеска являлось в основном поглощение излучения локальных радиоисточников, расположенных северо-западнее, холодным веществом расширяющегося волокна.

СОБЫТИЕ 07.06.2011

Событие 07.06.2011 г. произошло в активной области NOAA 11226 (S22 W64) магнитного класса β . Оно было связано со вспышкой балла M 2.5 в мягком рентгене (данные GOES; начало в 06:16). До события в активной области на изображениях обсерватории BBSO в линии H α видно волокно. В микроволновом диапазоне произошел отрицательный всплеск типа послевсплескового уменьшения потока с максимальной глубиной поглощения и максимальной длительностью на частоте 1,42 ГГц (рис. 4). На станции Лермонт зарегистрированы также радиовсплески II и III типов.

Анализ наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне показал, что в событии 07.06.2011 г. произошла аномальная эрупция волокна, причем поглощающие фрагменты были хорошо видны на изображениях SDO/AIA не только в канале 304 Å, но и в канале 193 Å (рис. 5а), чего прежде не наблюдалось. Как и в исследованном ранее событии 13.07.2004 г. [5], вещество эруптивного волокна в виде огромного облака разлетелось над солнечной поверхностью и частично вернулось обратно. На изображениях в канале 193 Å также наблюдалась «волна EIT».

На разностном изображении SDO/AIA в 304 Å (рис. 5б) площадь потемнения на уровне 20%-го снижения яркости состави-

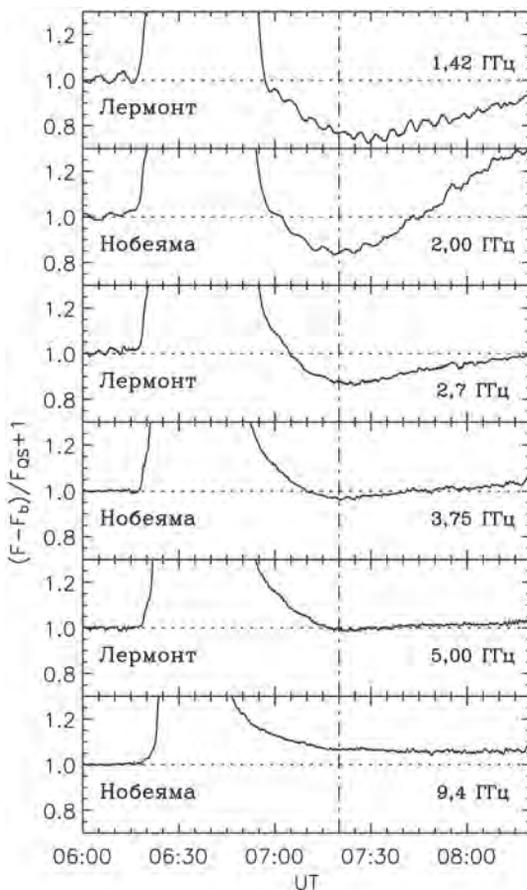


Рис. 4. Профили радиоизлучения на разных частотах, нормированные к уровню спокойного Солнца, в событии 07.06.2011 г.

ла 3,9% от площади солнечного диска, максимальная глубина потемнения – 90%. Вероятно, выброшенное вещество имело разную температуру, поэтому, кроме обширного потемнения, наблюдалась также область уярчения, площадь которого на уровне 20%-го повышения яркости была $\approx 2,7\%$. Общая площадь разлетевшегося при эрупции вещества, наблюдавшегося на фоне солнечного диска, составила $\approx 6,6\%$.

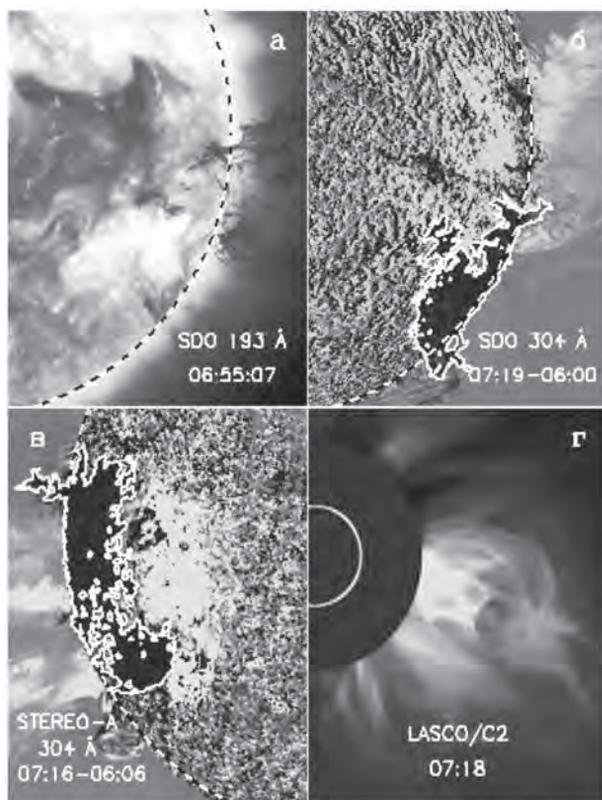


Рис. 5. Изображения фрагмента Солнца в событии 07.06.2011 г.: по данным SDO/AIA в канале 193 Å (а), разностные изображения по данным SDO/AIA и STEREO-A/EUVI в канале 304 Å (б, в), корональный выброс по данным SOHO/LASCO (г). Белым контуром на кадрах б, в показаны области потемнения на уровне 20%-го снижения яркости. Черно-белая пунктирная окружность – солнечный лимб

Эрупция волокна также видна на изображениях STEREO-A/EUVI 304 Å. Площадь потемнения на уровне 20%-го снижения яркости – 4,8%, площадь области уярчения – 3,3%. Общая площадь рассеянного над солнечным диском вещества составила $\approx 8\%$.

В событии зарегистрирован ускоряющийся КВМ типа гало по данным каталога коронографа SOHO/LASCO (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Огромные размеры площади, занимаемой разлетевшимися фрагментами эруптивного волокна, позволяют заключить, что в событии происходило поглощение излучения как локального источника, так и значительных областей спокойного Солнца, что и привело к возникновению отрицательного всплеска. Как и для первого события, по спектру наблюдаемого радиопоглощения (рис. 4) была выполнена оценка параметров поглощающего вещества. Поток от радиоисточника, вычисленный в 06:00 по изображениям Нобеяма на 17 ГГц, ≈ 3 с.е.п., во время события изображения отсутствуют.

Результаты применения модели показаны на рис. 6 сплошной линией, характеристики выброшенного вещества следующие: кинетическая температура – $T = 30\,000 \pm 1000$ К, оптическая толщина на 17 ГГц – $\tau_{17} = 0,045 \pm 0,005$, площадь облака по отношению к площади солнечного диска – $15 \pm 1\%$, его высота над хромосферой – $z = 100 \pm 20$ Мм, поток от затеняемого радиоисточника 6 с.е.п.

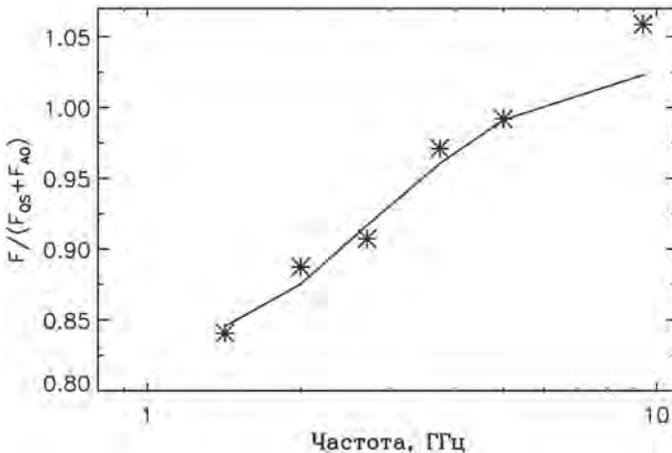


Рис. 6. Спектр глубины радиопоглощения во время события 07.06.2011 г. Звездочки – измеренные значения, сплошная линия – модельная аппроксимация

Площадь поглощающего облака почти в два раза больше, чем площадь, полученная по данным в канале 304 \AA , что может быть обусловлено различием в высоте излучающих слоев в радиодиапазоне и в крайнем ультрафиолете. Поток от затеняемого радиоисточника в два

раза выше его потока до события, что может объясняться излучением послевспышечных петель. Если принять величину радиопотока от источника во время события ≈ 9 с.е.п., то площадь поглотителя уменьшается до 8%, высота z – до 20 Мм, но его температура при этом возрастает до 37 000 К. В данном событии величина температуры в три раза выше, чем ее оценки, полученные при исследовании других событий [2, 5]. Отметим, что при оценке параметров поглотителя в модели рассматривается однородное облако с равномерно распределенной температурой, а в данном событии, судя по изображениям в крайнем ультрафиолете, разбрасываемое вещество имело разную температуру. Это показывает, что модель нуждается в дальнейшей доработке. При средней величине температуры 30 000 К, геометрической глубине облака $L \approx 100$ Мм масса поглотителя в 07:25 оценена в $6 \cdot 10^{15}$ г, что по порядку величины сравнимо с массой крупного волокна и КВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование эруптивных событий с двумя типами отрицательных всплесков. Событие 13.12.2011 г. представляло интерес тем, что в нем был зарегистрирован довольно редкий «изолированный» отрицательный всплеск. Анализ наблюдений показал, что в событии произошла эрупция волокна вне активной области, которая развивалась по первому сценарию. Это подтверждает вывод о том, что аномальная эрупция спокойного волокна вне комплекса активности маловероятна [1].

Событие 07.06.2011 г. является ярким пример аномальной эрупции волокна, причем поглощающие фрагменты впервые наблюдались не только в канале 304 Å, но и на оригинальных изображениях в корональных каналах. При этом в микроволновом диапазоне произошел отрицательный всплеск типа послевсплескового уменьшения радиопотока. Ранее были обобщены свойства событий с аномальными эрупциями [1], некоторые из них характерны и для события 07.06.2011 г.: эрупция волокна сопровождалась мощной вспышкой, «волной EIT» и радиовсплеском II типа. Отмечалось, что аномальный сценарий поглощения солнечного излучения эруптивным волокном более вероятен в случае сложной магнитной конфигурации, внутри

которой происходит эрупция. Внешними признаками такой ситуации является сложность магнитной конфигурации и окружение области эрупции другими активными областями, что и наблюдалось в событии 07.06.2011 г. Таким образом, свойства событий с аномальными эрупциями, выявленные ранее, в основном подтверждаются.

По записям отрицательных всплесков на ряде частот микроволнового диапазона в обоих событиях оценены параметры плазмы выброшенного вещества. Массы поглотителя оказались близки к характерной массе волокна и КВМ.

Кузьменко И.В. выражает благодарность сотруднику ИСЗФ СО РАН Анфиногентову С. за возможность использования созданных им программ для чтения архивированных файлов SDO с полным разрешением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречнев В.В., Кузьменко И.В., Черток И.М., Уралов А.М. Солнечные вспышечные эрупции с длительной экранировкой излучения в линии He II 304 Å и в микроволновом диапазоне // АЖ. 2011. Т. 88. № 7. С. 692–703.
2. Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М. Исследования солнечных эруптивных событий с отрицательными радиовсплесками // АЖ. 2009. Т. 86. № 11. С. 1114–1124.
3. Covington A.E. Decrease of 2800 MHz solar radio emission associated with a moving dark filament before the flare of May 19, 1969 // Solar Phys. 1973. Vol. 33, P. 439–444
4. Covington A.E., Dodson H.W. Absorption of 10.7-centimetre solar radiation during flare of May 19, 1951 // J. Roy. Astron. Soc. Canada. 1953. Vol. 47. P. 207–211.
5. Grechnev V.V., Uralov A.M., Slemzin V.A., Chertok I.M., Kuzmenko I.V., Shibasaki K. Absorption phenomena and a probable blast wave in the 13 July 2004 eruptive event // Solar Phys. 2008. Vol. 253. P. 263–290.
6. Sawyer C. Are «negative burst» due to absorption? // Solar Phys. 1977. Vol. 51. P. 203–215.