

УДК 523.98

## Эрупции спокойных волокон и связанные с ними отрицательные радиовсплески

*И.В. Кузьменко*

ФГБУН “Уссурийская астрофизическая обсерватория Дальневосточного отделения РАН”,  
с. Горно-Тажное, ул. Солнечная, 21, Россия, 692533  
*kuzmenko\_irina@mail.ru*

Поступила в редакцию 1 ноября 2015 г.

**Аннотация.** Исследованы эрупции спокойных волокон вне активных областей, наблюдавшиеся в канале 304 Å по данным SDO/AIA 16/17.08.2013 и 02.09.2014 и сопровождавшиеся отрицательными всплесками на ряде частот микроволнового диапазона. Впервые удалось подтвердить наблюдениями возможность возникновения отрицательных всплесков в интегральном потоке радиоизлучения в результате затенения веществом эруптивного волокна областей только спокойного Солнца. Выполненные оценки параметров поглощающего вещества показали, что площадь поглотителя составляла ~ 10% от площади солнечного диска, его высота над хромосферой  $\geq 100$  Мм. Это в 1.5–2 раза больше по сравнению с аналогичными параметрами при эрупциях волокон из активных областей, когда причиной отрицательных всплесков являлось в основном поглощение излучения от радиоисточников. Оцененная масса выбросов по порядку величины согласуется с массой крупного протуберанца.

ERUPTIONS OF QUIESCENT FILAMENTS AND ASSOCIATED NEGATIVE BURSTS, by *I.V. Kuzmenko*. Two eruptions of quiescent filaments outside of active regions observed by SDO/AIA in 304 Å on August 16/17, 2013 and on September 02, 2014 have been studied. The eruptions were accompanied by negative bursts observed at several frequencies in the microwave range. The observations directly demonstrate for the first time that a negative burst in the total flux of solar radio emission can appear due to the screening by the material of an eruptive filament of quiet Sun's areas only. Parameters of the absorbing material were estimated. The area of the absorber was ~ 10% of the solar disk, and its height above the chromosphere was  $\geq 100$  Mm. These parameters exceed by a factor of 1.5–2 similar quantities typical of filament eruptions from active regions, when the major cause of negative bursts is the absorption of the emission from compact radio sources. The model estimates of the masses of the ejecta are comparable to the mass of a large prominence.

**Ключевые слова:** спокойные волокна, эрупция, отрицательные радиовсплески

---

### 1 Введение

При эрупциях протуберанцев, наблюдаемых на фоне солнечного диска, иногда происходят отрицательные радиовсплески в микроволновом диапазоне, представляющие собой временное понижение интегрального потока ниже квазистационарного уровня радиоизлучения до и после

Эрупции спокойных волокон...

всплесков. Такие всплески были обнаружены А.Э. Ковингтоном в 1951 г. и интерпретированы им как результат поглощения радиоизлучения в веществе эруптивного протуберанца (Ковингтон, Додсон, 1953). Более поздние исследования (Ковингтон, 1973; Соје, 1977) привели к сценарию затенения микроволнового радиоисточника облаком холодного поглощающего вещества.

Исследования событий с отрицательными всплесками, выполненные нами по данным различных спектральных диапазонов (Кузьменко и др., 2009; Гречнев и др., 2011, 2013), позволили получить о них новую информацию:

- Выявлено, что такие события наблюдаются довольно редко (Гречнев и др., 2013). Большинство отрицательных всплесков относятся к типу “послевсплесковое уменьшение потока”, т. е. понижение уровня излучения ниже предвсплескового уровня происходит после импульсного всплеска. События с “изолированным” поглощением и отрицательными всплесками, предшествующими импульсным, почти не исследованы из-за своей редкости.
- Установлено, что причиной отрицательных всплесков являлось поглощение веществом эруптивного волокна излучения не только локальных радиоисточников, но и обширных площадей спокойного Солнца. Оценки параметров поглотителя в нескольких событиях, выполненные по разработанной нами модели с использованием наблюдаемых величин поглощения на разных частотах, подтвердили, что им было вещество эруптивного протуберанца.
- Показано, что 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 (Гречнев и др., 2011).

Все изученные ранее эруптивные события были связаны с активными областями и происходящими в них вспышками. В результате эрупции вещество протуберанца при своем движении непременно поглощало излучение от радиоисточника, который находился либо в этой же активной области, либо в соседней. Поскольку отрицательные всплески наблюдались в интегральном потоке радиоизлучения, то было очевидно, что затенение яркого источника должно привести к уменьшению величины радиопотока. Однако до сих пор не было наблюдений, которые подтвердили бы, что похожие депрессии возникают при поглощении излучения областей только спокойного Солнца. Для этого необходимы такие условия как отсутствие активных областей вблизи эруптивного волокна и отсутствие вспышек во время эрупции.

Целью настоящей работы являлось исследование эрупций спокойных волокон 16/17.08.2013 и 02.09.2014, расположенных вне активных областей, во время которых вещество волокна, расширяясь при своем движении, затеняло области спокойного Солнца. В разделе 2 представлен анализ наблюдений событий в крайнем ультрафиолетовом и в микроволновом диапазонах, а также приведены оцененные нами параметры выбросов. Раздел 3 посвящен обсуждению полученных результатов и их обобщению.

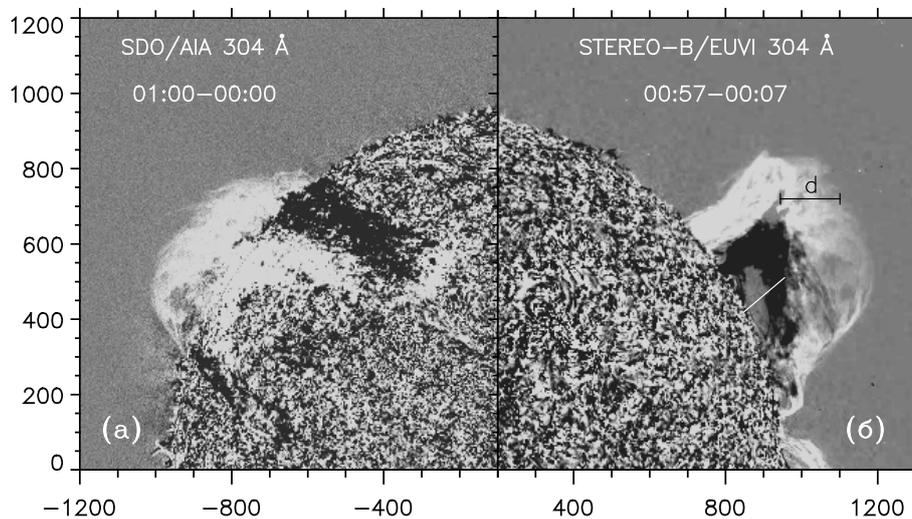
## 2 Анализ наблюдений и оценки параметров выброса

Основными источниками информации являлись различные интернет-центры данных. Для анализа наблюдений использовались изображения, полученные космическими телескопами SDO/AIA (FITS-файлы взяты на сайтах <http://jsoc.stanford.edu/data/aia/synoptic/>) и STEREO/EUVI ([http://sharp.nrl.navy.mil/cgi-bin/swdbi/secchi\\_flight/img\\_short/form](http://sharp.nrl.navy.mil/cgi-bin/swdbi/secchi_flight/img_short/form)) в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Используются записи интегральных потоков радиоизлучения с радиополяриметров Нобеема (<ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/xdr/>) и станций Лермонт и Сагамор-

Хилл Сети солнечных радиотелескопов RSTN BBC США (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/>), а также с радиометра на частоте 2.8 ГГц Уссурийской обсерватории ([http://www.uafo.ru/observ\\_rus.php](http://www.uafo.ru/observ_rus.php)).

### 2.1 Событие 1: 16/17.08.2013

В ходе события 16/17.08.2013 в интервале 22:50:00–02:00:00 UT (здесь и далее указано всемирное время) произошла эрупция спокойного волокна в северо-восточном квадранте солнечного диска вне комплексов активности. Эруптивный протуберанец наблюдался на изображениях в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, полученных на телескопах SDO/AIA и STEREO-B/EUVI. Его часть, видимая над лимбом, в канале 304 Å была яркой, на диске же наблюдались расширяющиеся потемнения (рис. 1а). По данным коронографа SOHO/LASCO ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) был зарегистрирован корональный выброс, имеющий обычную трехкомпонентную структуру.



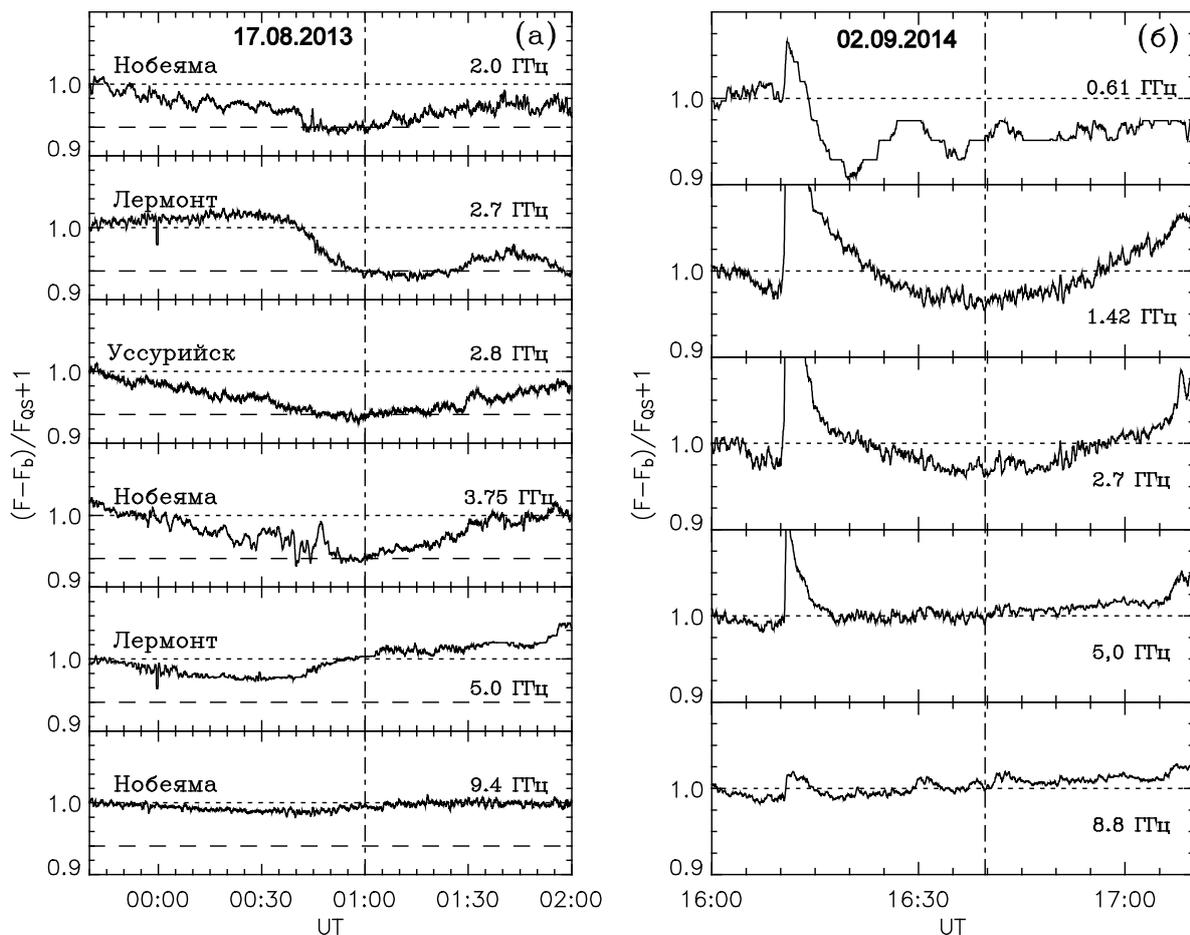
**Рис. 1.** Эрупция спокойного волокна 16/17.08.2013 на разностных изображениях SDO/AIA (а) и STEREO-B/EUVI (б) в канале 304 Å. По осям – угловые секунды от центра солнечного диска

Во время события в микроволновом диапазоне в обсерваториях Нобейма, Уссурийск и Лермонт наблюдались “изолированные” отрицательные всплески. На рис. 2а приведены временные профили интегральных потоков радиоизлучения на разных частотах. Уровни радиопотоков до всплеска ( $F_b$ ) вычтены, записи сглажены за 10 с и нормированы к уровню спокойного Солнца ( $F_{QS}$ ) на каждой частоте. Максимальная глубина поглощения в 01:00 составила  $\approx 6.5\%$  от уровня радиоизлучения спокойного Солнца на частотах 2–3.75 ГГц. Поглощение наблюдалось и на частотах 5 и 9.4 ГГц, но в более раннее время.

Как показал анализ наблюдений, активных областей (а следовательно, и возможных затеняемых радиоисточников) на пути движения волокна не было, поэтому причиной отрицательного всплеска во время этого события являлось поглощение излучения только областей спокойного Солнца. В работе Кузьменко и др. (2009) разработана модель для оценки параметров поглощающего вещества по наблюдаемым величинам депрессии радиоизлучения на разных частотах. Задавая и варьируя четыре параметра поглотителя, можно подогнать модельную аппроксимацию как можно ближе к наблюдаемым значениям радиопоглощения. Используя эту модель, мы оценили параметры поглощающего вещества в данном событии. На рис. 3а измеренные вели-

Эрупции спокойных волокон...

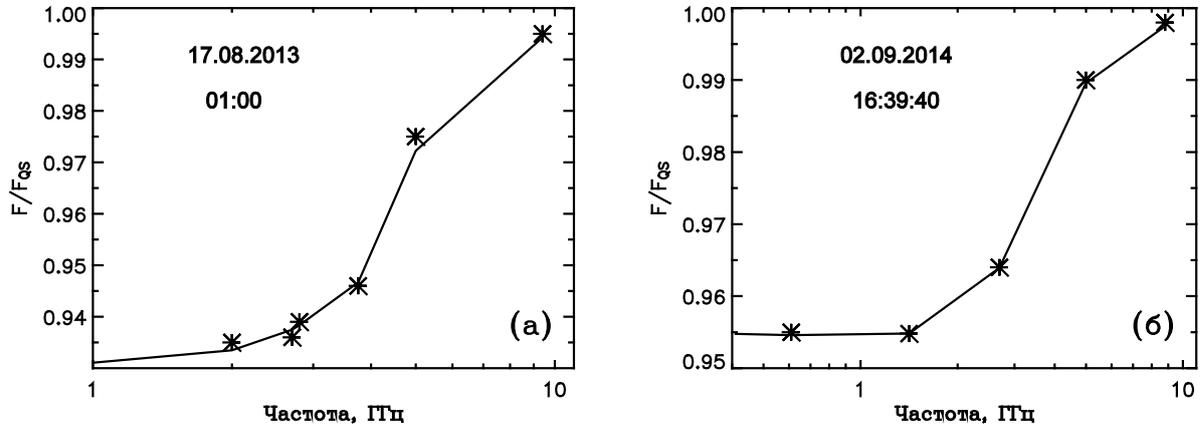
чины поглощения показаны звездочками, а расчетная кривая – сплошной линией. На частоте 5 ГГц максимальная величина депрессии излучения была измерена в 00:40, на остальных частотах – в 01:00. Наилучшее согласие расчетной кривой с наблюдениями получено при следующих параметрах поглотителя: кинетическая температура  $T = 9000 \pm 500$  К, оптическая толщина на 17 ГГц  $\tau_{17} = 0.06 \pm 0.01$ , площадь затеняющего облака по отношению к площади солнечного диска ( $10.5 \pm 0.1$ )%, его высота над хромосферой  $z = 160 \pm 10$  Мм. Эта высота близка к ее оценке по изображению STEREO-B/EUVI в канале 304 Å в 00:57. Расстояние между лимбом (фотосферой) и нижним краем протуберанца в направлении, показанном белым отрезком на рис. 1б, составило  $140 \pm 10$  Мм.



**Рис. 2.** Профили радиоизлучения, нормированные к уровню спокойного Солнца 16/17.08.2013 (а) и 02.09.2014 (б). Для события 02.09.2014 использованы данные Сагамор-Хилл. Штрих-пунктирной линией отмечен момент времени, когда выполнялись измерения величин радиопоглощения

Для нахождения массы поглощающего облака желательно иметь оценку его геометрической толщины  $L$ . Для этого использовались изображения с телескопа STEREO-B/EUVI, гелиоцентрический угол между Землей и космическим аппаратом составлял  $\approx 138^\circ$ . По изображению STEREO-B/EUVI в 00:57 (рис. 1б) оценена средняя ширина эруптивного волокна  $d \approx 110$  Мм. Реальную геометрическую толщину поглощающего облака можно оценить как  $L =$

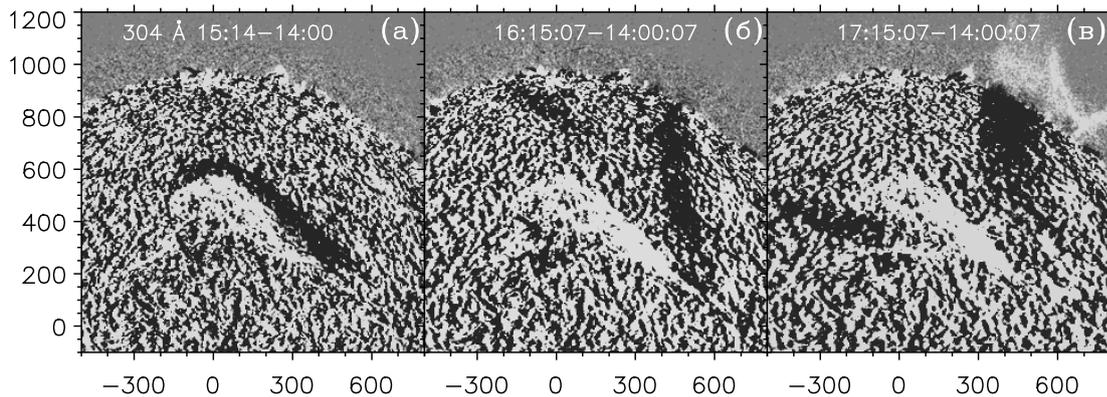
$d/\cos(138^\circ-90^\circ) \approx 160$  Мм. Тогда масса поглотителя будет  $\approx 3.4 \cdot 10^{15}$  г, что по порядку величины сравнимо с массой крупного протуберанца.



**Рис. 3.** Измеренные значения радиопоглощения (звездочки) и их модельная аппроксимация (сплошная линия) в событиях 16/17.08.2013 (а) и 02.09.2014 (б)

## 2.2 Событие 2: 02.09.2014

Анализ наблюдений изображений с телескопа SDO/AIA в канале  $304 \text{ \AA}$  в ходе события 02.09.2014 показал, что спокойное волокно, располагавшееся почти в центре северного полушария Солнца вне активных областей, начало подниматься с 14:00 UT. Во время своего подъема и расширения вещество волокна поглощало излучение спокойного Солнца в канале  $304 \text{ \AA}$  в интервале времени 14:40–19:30, что наблюдалось в виде обширных перемещающихся потемнений (рис. 4). Отметим, что волокно двигалось сначала на северо-запад, а после 16:40 резко повернуло на север-восток. Такое изменение направления движения, возможно, связано с тем, что к северо-западу от волокна располагалась корональная дыра (как в работе Дзян и др. (2007)).



**Рис. 4.** Эрупция спокойного волокна 02.09.2014 на изображениях SDO/AIA в канале  $304 \text{ \AA}$ . По осям – угловые секунды от центра солнечного диска

Поглощение наблюдалось и в радиодиапазоне в виде отрицательных всплесков на частотах  $< 5$  ГГц по данным станции Сагамор-Хилл в 16:25–16:55. На рис. 2б записи интегрального ра-

Эрупции спокойных волокон...

диоизлучения сглажены по 20 точкам и нормированы к уровню спокойного Солнца. Максимальная глубина поглощения составила  $\approx 4.5\%$  на частотах 1.42 и 2.7 ГГц в 06:39:40. В этом событии отрицательные всплески можно классифицировать как “послевсплесковое уменьшение потока”, хотя на рис. 2б видно, что депрессия излучения началась еще до импульсного всплеска в 16:10. По данным SOHO/LASCO в событии произошел корональный выброс массы, ядром которого было эруптивное волокно.

Выполнив измерения депрессии радиоизлучения на разных частотах в 06:39:40 и используя модель для оценки параметров поглощающего вещества, мы нашли, что расчетная кривая хорошо аппроксимирует наблюдаемые значения при таких параметрах поглотителя как: кинетическая температура  $T = 9000 \pm 500$  К, оптическая толщина на 17 ГГц  $\tau_{17} = 0.033 \pm 0.002$ , площадь экрана по отношению к площади солнечного диска  $(8 \pm 0.1)\%$ , его высота над хромосферой  $z = 100 \pm 10$  Мм. На рис. 3б наблюдаемые значения радиопоглощения показаны звездочками, их аппроксимация – сплошной линией.

Космические аппараты STEREO находились почти на противоположной стороне от Солнца (гелиоцентрический угол между Землей и аппаратами составлял  $> 161^\circ$ ), поэтому изображения со STEREO не могли помочь в определении толщины эруптивного волокна. Геометрическую толщину поглощающего облака можно приблизительно оценить как  $\sqrt{S} \approx 350$  Мм, тогда масса поглотителя составляла  $\approx 2 \cdot 10^{15}$  г.

### 3 Обсуждение и заключение

В исследуемых событиях отрицательные всплески в микроволновом диапазоне обусловлены поглощением веществом эруптивного волокна излучения областей только спокойного Солнца, поскольку активных областей поблизости не было. Можно ожидать, что такое поглощение должно наблюдаться как “изолированный” отрицательный всплеск, но во время события 02.09.2014 произошла депрессия излучения после импульсного радиовсплеска. Всплеск с началом в 16:10 трудно однозначно связать с какой-то конкретной областью солнечного диска из-за регистрации интегрального потока радиоизлучения.

Отметим, что в мягком рентгене во временном промежутке 14:30–17:00 не было зарегистрировано никаких вспышек. Слабые ленты от эрупции (подобно вспышечным) были видны на изображениях в  $304 \text{ \AA}$  только после 16:55, когда началось увеличение излучения в радиодиапазоне (рис. 2б) и в мягком рентгене. Источник импульсного всплеска мог находиться в любой из активных областей на Солнце, а начало всплеска могло просто совпасть по времени с началом депрессии радиоизлучения.

Случай затенения эруптивным волокном областей только спокойного Солнца является наиболее простым вариантом в разработанной ранее модели оценки параметров поглощающего вещества по наблюдаемым величинам радиопоглощения, но до сих пор не было возможности применить его к реальному событию. Использование модели для исследованных событий позволило оценить площадь поглощающих облаков в микроволновом диапазоне, которая составила  $\sim 10\%$  от площади солнечного диска. В исследованиях (Кузьменко и др., 2009; Гречнев и др., 2013) эта площадь оценена в 2–6%. Однако в тех случаях происходило поглощение излучения как областей спокойного Солнца, так и локального радиоисточника.

Отметим, что высоты поглощающего вещества над хромосферой (100 и 160 Мм) в исследованных событиях также получились больше, чем в (Кузьменко и др., 2009), где оценки высот составляли от 20 до 80 Мм. Но те события были связаны с эрупциями волокон из активных областей, поэтому их высоты были значительно меньше. Средняя же высота спокойных протуберанцев составляет 100 Мм, поэтому полученные в этой работе оценки вполне реальны. Температура вещества эруптивных волокон (9000–10000 К) и его масса ( $\sim 10^{15}$  г) согласуются с оцен-

ками температур и масс выбросов, полученных для других событий (Кузьменко и др., 2009; Гречнев и др., 2013).

Из анализа наблюдений следует, что поглощение излучения веществом расширяющихся протуберанцев наблюдалось также на изображениях в канале переходного слоя  $304 \text{ \AA}$  в виде крупномасштабных перемещающихся потемнений. Такие депрессии излучения могут возникать в результате поглощения фонового излучения Солнца облаком холодной водородно-гелиевой плазмы (Гречнев и др., 2011).

В заключение обобщим полученные нами результаты. Анализ наблюдений эруптивных протуберанцев 16/17.08.2013 и 02.09.2014 показал, что их расширение и эрупция происходили вне активных областей. Впервые удалось подтвердить наблюдениями возможность возникновения отрицательных всплесков в интегральном потоке радиоизлучения в результате затенения веществом эруптивного волокна областей только спокойного Солнца. Наличие записей радиоизлучения на разных частотах позволило выполнить оценки параметров поглотителя в этих событиях. Выяснено, что площадь и высота поглощающего облака оказались в 1.5–2 раза больше по сравнению с аналогичными параметрами при эрупции волокон из активных областей. Оцененная масса поглотителя по порядку величины согласуется с массой крупного протуберанца.

Автор признателен В.В. Гречневу и С.А. Анфиногентову за возможность использования их программного обеспечения при работе с данными. Автор благодарен коллективам обсерваторий Нобеяма, Лермонт и Сагамор-Хилл за данные интегрального потока радиоизлучения на разных частотах, а также коллективам проектов SDO и STEREO за данные, использованные при анализе. Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 12-II-CO-02-007.

## Литература

- Гречнев В.В., Кузьменко И.В., Черток И.М., Уралов А.М. // Астрон. журн. 2011. Т. 88. С. 692.  
Гречнев и др. (Grechnev V., Kuzmenko I., Uralov A., Chertok I., Kochanov A.) // Publ. Astron. Soc. Japan. 2013. V. 65. SP10.  
Дзян и др. (Jiang Y., Yang L., Li K., Shen Y.) // Astrophys. J. 2007. V. 667. L105.  
Ковингтон, Додсон (Covington A.E., Dodson H.W.) // J. Roy. Astron. Soc. Canada. 1953. V. 47. P. 207.  
Ковингтон (Covington A.E.) // Solar Phys. 1973. V. 33. P. 439.  
Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М. // Астрон. журн. 2009. Т. 86. С. 1114.  
Сойе (Sawyer C.) // Solar Phys. 1977. V. 51. P. 203.