

УДК 523.945

## ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО ЗАТМЕННЫМ И ВНЕЗАТМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В ПЕРИОД МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. А. Д. Шрамко, С. А. Гусева

Горная астрономическая станция ГАО РАН, г. Kislovodsk, Россия

e-mail: a\_shramko@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.11.2010 г.

После доработки 06.07.2011 г.

В работе для исследования корональных дыр (КД) Солнца в минимуме 23-го цикла активности привлечены данные орбитальной обсерватории SOHO, наземные наблюдения радиотелескопов Kislovodskской горной астрономической станции ГАО РАН (ГАС ГАО) и радиогелиографа Nobeyama (Япония). Хотя период 2006–2008 гг. характеризовался малым количеством активных областей на диске Солнца, он, тем не менее, благоприятен для изучения малоcontrastных объектов в радиодиапазоне – КД. Исследуется эволюция площадей КД, расположение КД на диске Солнца и особенности их излучения в радиодиапазоне. Представлены результаты наблюдений полного 29.03.2006 г. и частного 01.08.2008 г. солнечных затмений на радиотелескопах РТ-3 и РТ-2 ГАС ГАО. Из затменных наблюдений отождествлены компактные источники на диске Солнца и вклад КД в интегральный поток радиоизлучения. Обнаружен необычный эффект: повышенное радиоизлучение низкоширотных КД на длине волны 4.9 см, которое может быть обусловлено яркими рентгеновскими точками в КД. При этом полярные КД характеризуются пониженным уровнем радиоизлучения.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование солнечных корональных дыр (КД) является одной из актуальных задач физики Солнца. Известно, что КД являются источниками квазистационарных потоков высокоскоростного солнечного ветра (до 700 км/с у орбиты Земли), удаляющегося от Солнца вдоль “разомкнутых” силовых линий магнитного поля (МП). КД связывают с солнечными источниками рекуррентных геомагнитных возмущений.

Начиная с 1960-х годов, КД начали интенсивно изучать со спутников в ультрафиолетовом (УФ) и рентгеновском диапазоне длин волн. КД являются долгоживущими протяженными образованиями с пониженной температурой, низкой плотностью плазмы и с открытой конфигурацией магнитных силовых линий. КД возникают внутри больших униполярных ячеек крупномасштабного МП. Низкоширотные, как и полярные КД имеют тенденцию развиваться в тех ячейках, полярность которых соответствует полярности полярной шапки в том же полушарии.

КД наиболее четко выявляются на снимках Солнца в мягких рентгеновских лучах, а также на спектрогелиограммах в корональных линиях далекой УФ-области. КД хорошо видны также в метровом ( $\lambda < 4$  м) диапазоне. Первые исследования КД в сантиметровом диапазоне выполнили Fürst и Hirth [1975], Shibasaki et al. [1978], Ferguson [1981]. Wefel и Papagiannis [1980] нашли, что на

волне 9.1 см крупные КД хорошо видны как обширные области пониженной радиояркости, с контрастом 10–20%. Боровик и Лившиц [1982] по ежедневным радиосканам, полученным на Большом Пулковском радиотелескопе, обнаружили явление уменьшения радиорadiusа Солнца на волне 9 см при “выходе” КД на край диска.

В данной работе приводятся результаты радионаблюдений полного (29.03.2006 г.) и частого (01.08.2008 г.) солнечных затмений. Солнечное затмение – уникальное событие, каждый раз дающее новые наблюдательные данные.

Рассматриваемый период 2006–2008 гг. пришелся на минимум 23-го цикла активности Солнца, и характеризовался малым количеством активных областей, в значительной мере влияющие на интегральный поток радиоизлучения Солнца. Особое внимание было уделено тем дням, когда на видимом диске Солнца наблюдались только КД, а активные области отсутствовали.

Цель работы – исследовать влияние КД на интегральный поток радиоизлучения Солнца по затменным и внезатменным наблюдениям, изучение эволюции площадей КД, их расположение на диске Солнца в оптическом диапазоне и отклик этих параметров в радиодиапазоне по данным наблюдений радиотелескопа РТ-3 ( $\lambda = 4.9$  см) ГАС ГАО и радиогелиографа NoRH ( $\lambda = 1.76$  см) обсерватории Nobeyama (Япония).

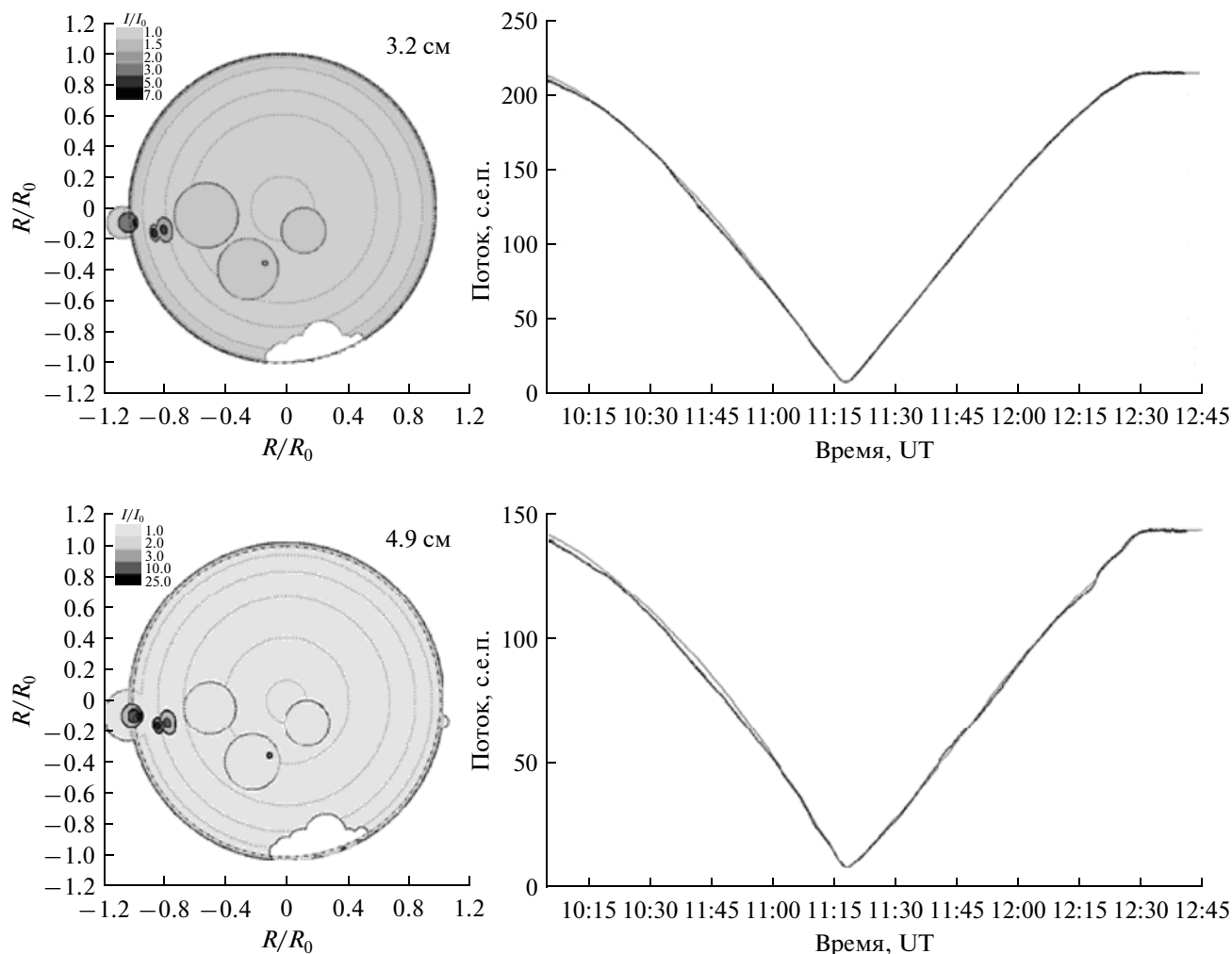


Рис. 1. Радиокарты Солнца и соответствующие им затменные кривые.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В работе использованы данные ежедневных наблюдений в период минимума солнечной активности (2006–2008 гг.) следующих инструментов:

- 1) Радиотелескопов РТ-3 ( $\lambda = 4.9$  см.), РТ-2 ( $\lambda = 3.2$  см.) Кисловодской ГАС ГАО РАН;
- 2) Радиогелиографа NoRH обсерватории Nobeyama ( $\lambda = 1.76$  см);
- 3) Спектрогелиограф EIT в  $\lambda = 171, 195, 284 \text{ \AA}$ , орбитальной обсерватории SOHO.

Регистрация радиоизлучения полного солнечного затмения 29.03.2006 г. и частного солнечного затмения 01.08.2008 г. производилась на двух радиотелескопах Горной астрономической станции РТ-3 и РТ-2 в канале интенсивности (параметр Стокса I) квазиульевым методом [Шрамко и др., 2007]. Сигналы записывались на ПК, с помощью 12-разрядного АЦП по двум независимым каналам с постоянной времени 0.5 с. В месте наблю-

дения (географические координаты  $l = 42^{\circ}40' \text{ E}$ ,  $\varphi = 43^{\circ}44' \text{ N}$ ) максимальные фазы затмения составила 1.04 и 0.4 для затмений 29.03.2006 г. и 01.08.2008 г. соответственно. Затмение 01.08.2008 г. произошло в день, когда на диске Солнца не было мощных источников кроме полярных КД. Для затмения 01.08.2008 г. исследовалась только кривая покрытия на  $\lambda = 4.9$  см.

Высокое пространственное (10 угл. с) и временное (1 с) разрешение радиогелиографа NoRH  $\lambda = 1.76$  см позволяет эффективно использовать этот инструмент для исследования радиоизлучения как точечных, так и протяженных образований на Солнце. Для исследования радиоизлучения КД использовались ежедневные радиокарты интенсивности Солнца NoRH с усреднением 10 мин., представленные в *fits* формате (сайт <http://solar.ngo.nao.ac.jp>). В рассматриваемый период минимума солнечной активности (2006–2008 гг.) нами было обработано 2079 радиокарт.

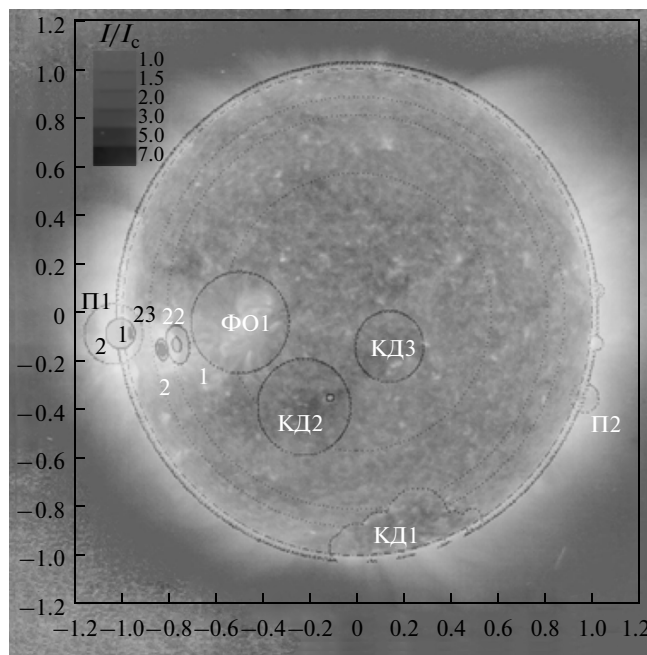


Рис. 2. Наложение изображения SOHO EIT 284 Å на радиокарту.

Для отождествления локальных источников на диске Солнца и получения широтно-временных и эволюционных распределений КД использовались данные орбитальной обсерватории SOHO (спектрогелиограф EIT).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29.03.2006 г.

Если предположить, что на Солнце во время затмения не было быстротекающих процессов, пульсаций и колебаний высокой мощности,

Радиоизлучение активных областей Солнца, которые были получены из модели

Области:	$\lambda = 3.2$ см		$\lambda = 4.9$ см	
	Фотн., $F/F_{\text{ц}}$	Фабс., с.е.п./ $(\text{arcs})^2$	Фотн., $F/F_{\text{ц}}$	Фабс., с.е.п./ $(\text{arcs})^2$
22(1)	2.2	$136 \times 10^{-6}$	14.0	$519 \times 10^{-6}$
22(2)	4.0	$246 \times 10^{-6}$	15.0	$557 \times 10^{-6}$
23	7	$431 \times 10^{-6}$	17.0	$631 \times 10^{-6}$
П1(1)	3.2	$197 \times 10^{-6}$	12.0	$445 \times 10^{-6}$
П1(2)	1.1	$68 \times 10^{-6}$	1.2	$45 \times 10^{-6}$
П2	—	—	1.2	$45 \times 10^{-6}$
ФП	1.4	$86 \times 10^{-6}$	2.3	$85 \times 10^{-6}$
КД1	0.8	$49 \times 10^{-6}$	0.2	$11 \times 10^{-6}$
КД2	1.4	$86 \times 10^{-6}$	1.9	$71 \times 10^{-6}$
КД3	1.4	$86 \times 10^{-6}$	1.9	$71 \times 10^{-6}$

Примечания: В таблице приведены радиоизлучения активных областей в относительных (относительно излучения центра диска Солнца) и абсолютных единицах.

Области:

22(1), 22(2), 23 – группы пятен Солнца;

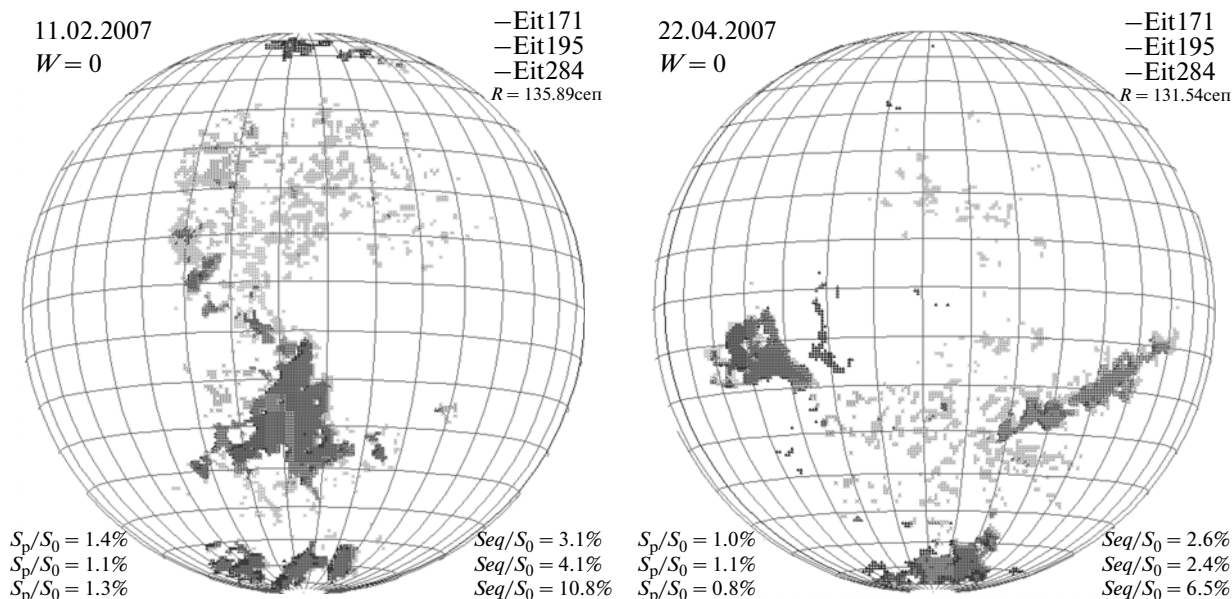
П1(1), П1(2), П2 – области, находящиеся за лимбом Солнца;

ФП – факельная площадка Солнца;

КД1, КД2, КД3 – корональные дыры на Солнце;

Фотн.,  $F/F_{\text{ц}}$  – поток радиоизлучения в относительных (относительно излучения центра диска Солнца) значениях.

Фабс., с.е.п./ $(\text{arcs})^2$  – поток радиоизлучения в абсолютных значениях (поток в с.е.п., исходящий из площадки площадью в одну квадратную угловую секунду –  $\text{arcs}$ ).



**Рис. 3.** Пример ежедневных карт КД, найденных в линиях  $\lambda = 171, 195, 284 \text{ \AA}$  с информацией об интегральных площадях полярных и низкоширотных КД. За данный день указаны значения числа Вольфа и интегральный радиопоток на волне  $\lambda = 4.9 \text{ см}$ .

то по кривой покрытия можно определить поток радиоизлучения от отдельных активных и невозмущенных областей Солнца. Для отождествления локальных источников на диске Солнца (рисунки 1, 2) были построены дифференциальные затменные кривые, по которым определялись их координаты, размеры и радиопотоки.

При анализе радионаблюдений полного солнечного затмения 29.03.2006 г. на Кисловодской Горной станции ГАО РАН [Шрамко и др., 2007] на кривых покрытия были видны крупномасштабные неоднородности, которые мы отождествили с факельной площадкой и КД, расположенными в центре и на южном полюсе Солнца. Подбирая параметры этих областей мы построили радиокарты Солнца (рис. 1).

Потоки радиоизлучения активных областей в относительных (приведенных к излучению центра диска Солнца) и абсолютных единицах даны в таблице.

Нас заинтересовал весьма необычный факт, заключающейся в том, что полярная КД имела пониженную радиояркость, а центральная — повышенную. Это подтолкнуло нас к дальнейшему исследованию явления.

#### 4. АНАЛИЗ ПЛОЩАДЕЙ КД И ИХ ОТКЛИК В РАДИОДИАПАЗОНЕ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 4.9 см

Мы решили проверить указанный результат и установить, является ли это закономерностью для различных КД [Шрамко и Гусева, 2008a]. С

помощью пакета IDL6.1 (Interactive Data Language) нами была создана программа для оцифровки координат КД на ежедневных снимках EIT (SOHO) в линиях  $\lambda = 171, 195$  и  $284 \text{ \AA}$ . Для каждого изображения подбирался порог яркости, а области с яркостью меньше этого порога фиксировались, как области КД. Этот порог считался в две итерации. Сначала рассчитывалась средняя яркость всего солнечного диска, а далее — средняя яркость без областей с сильно повышенной или пониженной яркостью ( $\pm 50\%$ ) от средней яркости всего диска. Так как контрастность снимков сильно меняется ото дня ко дню, постоянно проводился визуальный контроль найденных объектов. В результате этого получен каталог ежедневных карт расположения КД на диске Солнца за период 2006—2008 гг. Пример таких карт показан на рис. 3.

Обработка цифровых данных позволила получить широтно-временные распределения КД и эволюционные ряды интегральных площадей КД в избранных линиях (рис. 4).

Из рисунка 4 видно, что существует зависимость значений площадей КД от длины волны. Наибольшие величины интегральных площадей наблюдаются в линии  $\lambda = 284 \text{ \AA}$ , а наименьшие — в  $\lambda = 171 \text{ \AA}$ . Видна также большая флуктуация значений интегральных площадей, которая связана с эффектом видимости — в центре КД имеют много большие площади, чем КД близкие к лимбу, а площади полярных КД модулируются изменением гелиографической широты центра Солнца.

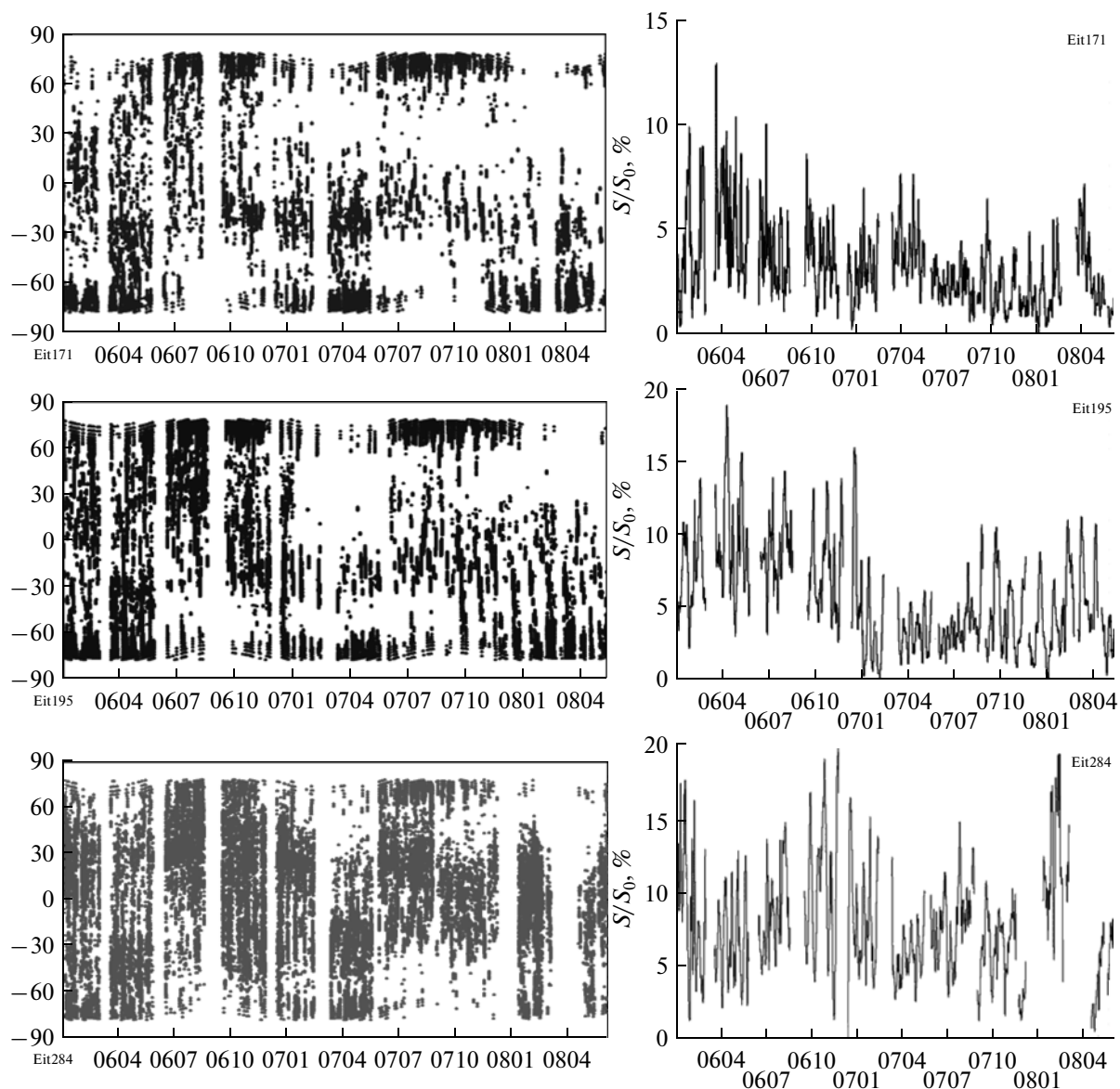


Рис. 4. Широтно-временные распределения и эволюционные ряды площадей КД для линий  $\lambda = 171, 195, 284 \text{ \AA}$ .

Мы уделили особое внимание тем дням, когда на видимом диске Солнца нет активных областей, но при этом присутствуют КД. В результате отбора общее количество таких дней составило 95. Распределение среднего за день радиопотока на длине волны 4.9 см для выбранных дней показано на рис. 5а.

Для выбранных дней был проведен анализ изменения площадей полярных ( $|\phi| > 60^\circ$ ) и низкоширотных КД от усредненного за день радиопотока на длине волны 4.9 см для трех рассматриваемых линий (рис. 5б, в, г). Анализ показал, что во всех рассматриваемых линиях при увеличении площадей низкоширотных КД радиопоток возрастает, что свидетельствует о повышенном радиоизлучении в этих областях по сравнению со

“спокойным” Солнцем. В некоторых точках, хорошо виден эффект компенсации повышенного радиоизлучения низкоширотных КД пониженным радиоизлучением областей в полярных КД.

#### 5. ЧАСТНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 1 АВГУСТА 2008 г.

Обработка наблюдений частного солнечного затмения 01.08.2008 г. на радиотелескопе РТ-3 (ГАС,  $\lambda = 4.9 \text{ см}$ ), была также произведена при предположении, что на Солнце не было быстропротекающих процессов. В таком случае по кривой покрытия можно найти поток радиоизлучения от отдельных активных и невозмущенных областей Солнца. Это предположение легко удовлетво-

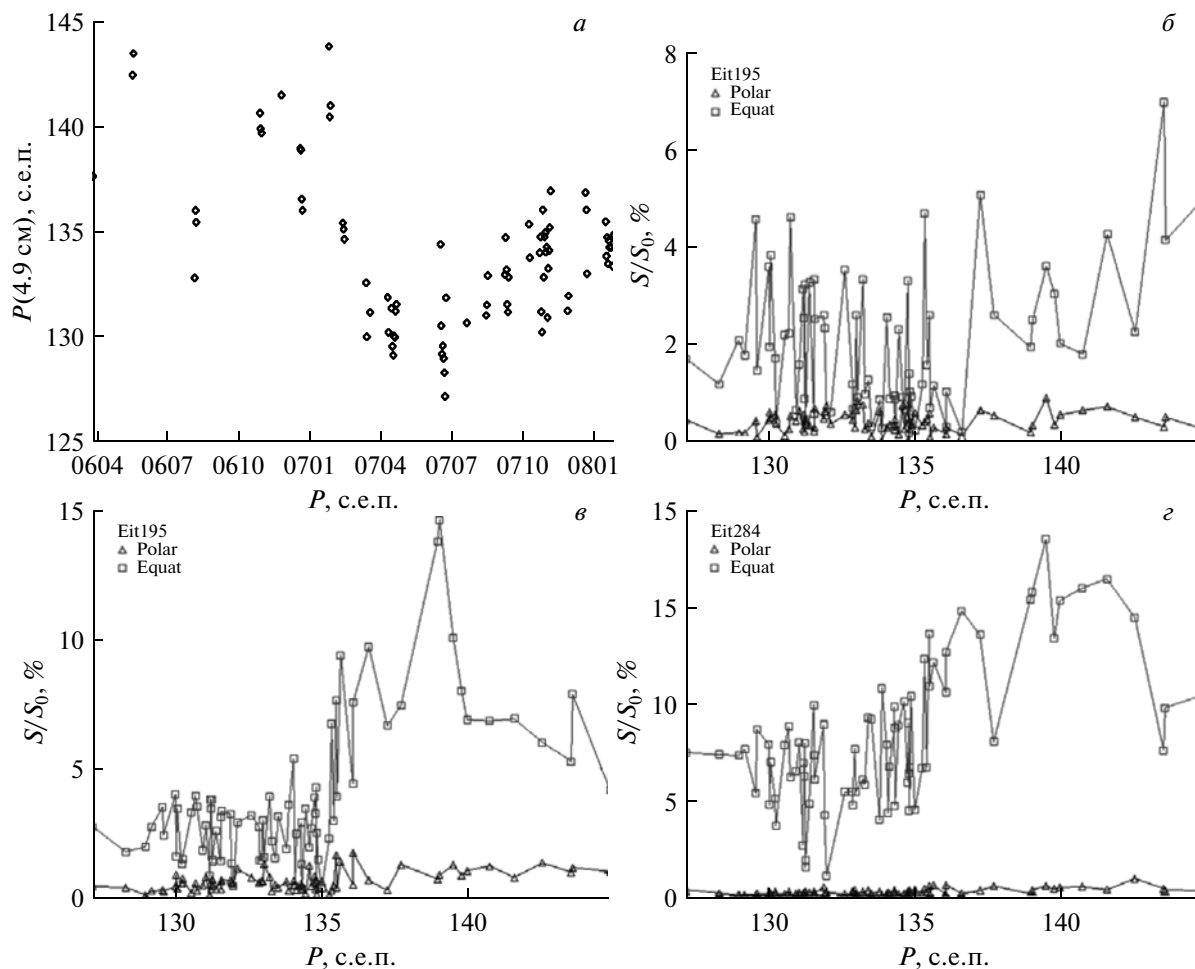


Рис. 5. Значения интегрального потока радиоизлучения и зависимости площадей полярных и низкоширотных КД от радиопотока на  $\lambda = 4.9 \text{ см}$  в выбранные дни, когда отсутствуют активные области, сильно влияющие на радиопоток.

руется, так как на диске Солнца не было мощных источников и по данным GOES не было заметно-го увеличения излучения во время затмения.

Отождествление источников на диске Солнца проводилось с использованием данных орбитальной обсерватории SOHO (спектрогелиограф EIT) (рис. 6). Для определения уровня радиоизлучения от различных участков на диске Солнца была создана программа на языке IDL6.1, которая моделирует процесс затмения по методике, описанной в работе [Шрамко и др., 2007].

1 августа 2008 г. на диске Солнца в северной полярной области наблюдалась протяженная, четко выраженная КД, которая полностью покрывалась Луной во время затмения (см. рис. 6). Координаты ее границ были найдены по данным SOHO EIT 195 Å. Были также отождествлены факельные площадки и лимбовый источник.

Используя расчеты [Шрамко и Гусева, 2007], можно определить теоретическое изменение интенсивности радиоизлучения от центра к лимбу, которое зависит от температуры верхнего слоя

хромосферы и короны. Эти расчеты и найденные источники были использованы при построении модели радиокарты Солнца для  $\lambda = 4.9 \text{ см}$  (рис. 7).

Используя карту на рис. 7 и подбирая радиоинтенсивность найденных источников, мы добивались максимального соответствия наблюдаемой и теоретической затменных кривых Солнца (рис. 8). Видно, что наблюдаемая и теоретическая кривая хорошо согласуются друг с другом.

Расчеты модельной кривой покрытия показали, что область полярной КД имеет пониженное на 25–40% радиоизлучение и значительно уменьшает интенсивность яркого лимба полярной области на длине волны 4.9 см [Шрамко и Гусева, 2010].

## 6. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОГЕЛИОГРАФА NOBEYAMA

Мы исследовали также влияние КД на интегральный поток радиоизлучения Солнца по данным радиогелиографа обсерватории Nobeyama на длине волны 1.76 см. [Шрамко и Гусева, 2008б].

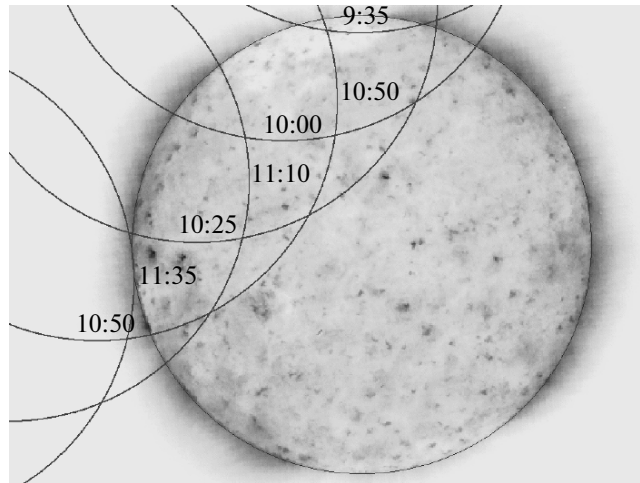


Рис. 6. Наложение фаз затмения 1 августа 2008 г. на негатив SOHO EIT 195 Å.

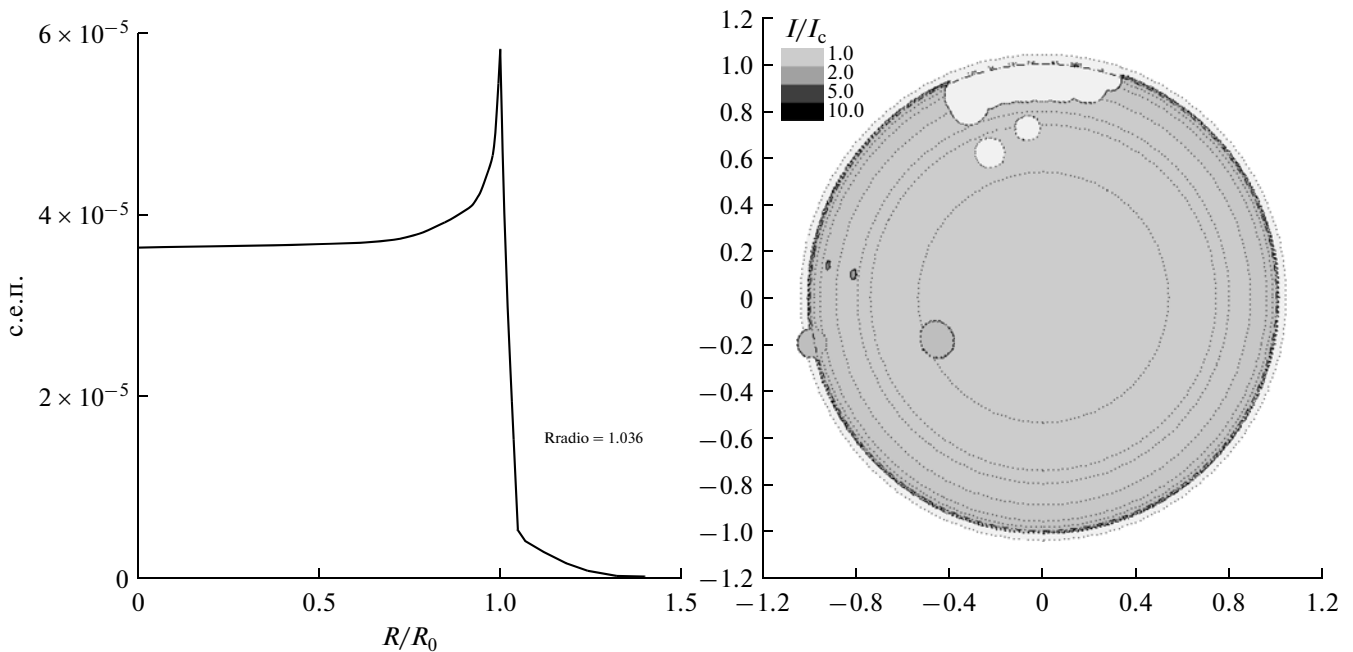


Рис. 7. Полученное изменение радиояркости Солнца от центра к лимбу и радиокарта для  $\lambda = 4.9$  см.

С помощью пакета IDL6.1 была написана компьютерная программа для оцифровки гелиографических координат КД на ежедневных снимках EIT (SOHO) в линии  $\lambda = 195$  Å, по методике, описанной в [Шрамко и Гусева, 2008а]. В период 2006–2008 гг. обработано 693 дня наблюдений.

Полученные координаты КД за данный день переносились на соответствующие радиокарты яркостной температуры (ЯТ) Солнца NoRH. Для уменьшения влияния помех за один день обрабатывались три радиокарты по отдельности. Для

каждой радиокарты находились: усредненные ЯТ для низкоширотных ( $|\varphi| < 60^\circ$ ) и полярных ( $|\varphi| > 60^\circ$ ) КД, а также средняя ЯТ диска Солнца. В результате были получены временные распределения этих величин (см. рис. 9).

Из рисунка видно, что по данным NoRH области полярных КД имеют повышенную, а низкоширотные – пониженную ЯТ на длине волны 1.76 см по сравнению со средней ЯТ диска Солнца. Анализ радиокарт NoRH показал, что на длине волны 1.76 см хорошо виден эффект увеличе-

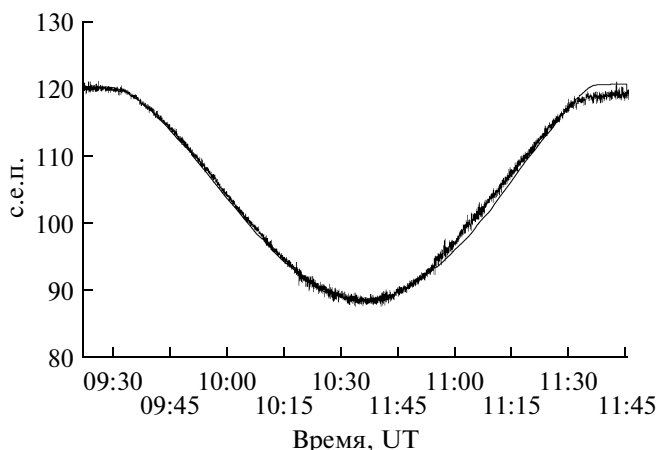


Рис. 8. Наблюдаемая и теоретическая затменные кривые Солнца для  $\lambda = 4.9$  см.

ния ЯТ от центра Солнца к лимбу. Нами была построена и проанализирована зависимость ЯТ для стационарных точек на южном и северном полюсе и для центра видимого диска Солнца. Для полярных областей видна годовая периодическая зависимость, которая, по-видимому, связана с изменением радиуса видимого диска или склонения Солнца в течение года. Эта периодичность накладывается и на зависимость для полярных КД. Исследование показало, что по данным NoRH для  $\lambda = 1.76$  см области КД не выявляются или имеют малую контрастность по сравнению с соседними областями, а зависимость для полярных и низкоширотных КД в основном определяется эффектом увеличения ЯТ от центра Солнца к лимбу.

## 7. ВЫВОДЫ

При анализе радионаблюдений полного солнечного затмения 29.03.2006 г. на ГАС ГАО [Шрамко и др., 2007] на кривых покрытия были видны крупномасштабные неоднородности, которые мы отождествили с факельной площадкой и КД, расположенными в центре и на южном полюсе Солнца. Тот необычный факт, что полярная КД имела пониженную радиояркость, а центральная — повышенную, привел нас к дальнейшему исследованию [Шрамко и Гусева, 2008a], в результате которого мы установили, что этот эффект не случайный. Низкоширотные КД связаны с областями повышенного, а полярные КД — с областями пониженного радиоизлучения на длине волны 4.9 см. Обработка наблюдений частного солнечного затмения 01.08.2008 г. на радиотелескопе РТ-3 ( $\lambda = 4.9$  см) по расчетам модельной кривой покрытия показали, что область полярной КД имеет пониженное на 25–40% радиоизлу-

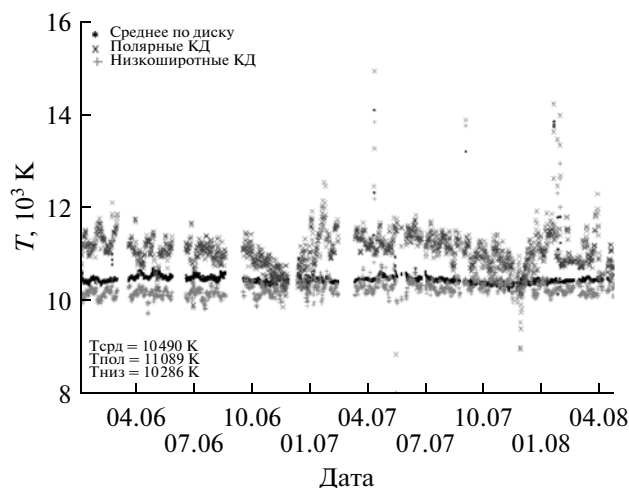


Рис. 9. Временные распределения ЯТ полярных и низкоширотных КД, и средней ЯТ диска Солнца по данным NoRH ( $\lambda = 1.76$  см).

чение и значительно уменьшает интенсивность яркого лимба полярной области [Шрамко и Гусева, 2010].

С другой стороны, исследование влияния КД на интегральный поток радиоизлучения Солнца по данным радиогелиографа Nobeyama на длине волны 1.76 см показало, что области КД не выявляются или имеют малую контрастность по сравнению с соседними областями, а зависимость для полярных и низкоширотных КД в основном определяется эффектом увеличения ЯТ от центра Солнца к лимбу. Это согласуется с результатами работы [Боровик и др., 2000], в которой сравнивалось радиоизлучение КД и соседних невозмущенных областей. Это сравнение показало, что на волнах короче 3 см различия отсутствуют. Различия проявляются на более длинных волнах. Отдельные наиболее интенсивные источники мелкомасштабной структуры отождествляются с яркими корональными точками, видимыми на ультрафиолетовых и рентгеновских изображениях Солнца [Боровик и др., 2000]. Эффективные радиоразмеры этих точек в КД практически постоянны и равны  $20 \pm 5$  секундам дуги. Их ЯТ растут с длиной волны. Именно таким образом можно объяснить повышенное радиоизлучение низкоширотных КД на длинах волн больше 3 см.

Авторы благодарят А.В. Степанова и М.А. Лившица за полезную дискуссию.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ и программ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боровик В.Н., Лившиц М.А. Изменение радиоразмера Солнца с появлением на лимбе корональной дыры // Астрон. журн. Т. 59. № 2. С. 355–364. 1982.



- *Боровик В.Н., Медарь В.Г., Гараимов В.И.* Мелкомасштабная структура микроволнового излучения корональных дыр и невозмущенного Солнца по наблюдениям на РАТАН-600 // Тр. междунар. конф. “Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналоги”. Пулково 17–22 сентября 2000 г. С.-Пб.: ГАО РАН. С. 112–114. 2000.
- *Шрамко А.Д., Гусева С.А.* Сравнительный анализ данных солнечного затмения 29 марта 2006 г. в сантиметровом радиодиапазоне с наблюдениями эмиссионных линий / Тр. XI Пулковской междунар. конф. “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”. Пулково 2–7 июля 2007 г. С.-Пб.: ГАО РАН. С. 365–368. 2007.
- *Шрамко А.Д., Гусева С.А.* Исследование излучения корональных дыр в период минимума солнечной активности / Тр. всероссийской ежегодной конф. по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2008”. Пулково 7 по 12 июля 2008 г. Ред. Наговицын Ю.А. С.-Пб.: ГАО РАН. С. 393–396. 2008а.
- *Шрамко А.Д., Гусева С.А.* Радиоизлучение корональных дыр по данным радиогелиографа Nobeyama в период минимума солнечной активности / Тр. междунар. семинара, посвященного 60-летию Горной астрономической станции ГАО РАН, “Синоптические наблюдения солнечной активности и прогноз ее геоэффективных проявлений”. Кисловодск 30 сентября–4 октября 2008 г. Кисловодск. С. 49. 2008б.
- *Шрамко А.Д., Гусева С.А.* Исследование радиоизлучения корональных дыр в минимуме активности солнца по частному затмению 01.08.2008 на ГАС ГАО РАН // Тр. всероссийской астрономической конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2010”. Пулково 13–18 сентября 2010 г. Ред. Степанов А.В. И Наговицын Ю.А. С.-Пб.: ГАО РАН, С. 369–374. 2010.
- *Шрамко А.Д., Сенник В.А., Тлатов А.Г.* Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 в радиодиапазоне на волнах 3.2 и 4.9 см. (ГАС ГАО РАН) // Тр. XI Пулковской международной конф. “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”. Пулково 2–7 июля 2007 г. С.-Пб. ГАО РАН. С. 369–374. 2007.
- *Ferguson B.G.* Central meridian passage dates of coronal holes, inferred from east-west solar scans at 692 and 1415 MHz, for the period January 1968–January 1974 // *Solar Phys.* V. 69. № 1. P. 185–209. 1981.
- *Fürst E., Hirth W.* A coronal hole observed at 10.7 GHz with a large single dish // *Solar Phys.* V. 42. № 1. P. 157–161. 1975.
- *Shibasaki K., Ishiguro M., Enome S., Tanaka H.* A coronal hole observed with a 2.8-cm Radioheliograph // *Publ. Astron. Soc. Japan.* V. 30. № 4. P. 589–600. 1978.
- *Wefer F.L., Papagiannis M.D.* Synoptic charts of solar 9.1 cm and coronal hole data // *Solar Phys.* V. 67. № 1. P. 13–21. 1980.