

УДК 523.945

ОБРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ЧАСТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 21.06.2020 г. ПОЛУЧЕННЫХ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 3.2 И 4.9 см НА ГОРНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ГАО РАН

© 2021 г. А. Д. Шрамко¹, *, С. А. Гусева¹, **

¹Горная астрономическая станция РАН (ГАО РАН), г. Кисловодск, Россия

*e-mail: a_shramko@inbox.ru

**e-mail: svgoal@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.12.2020 г.

После доработки 14.03.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Представлены результаты наблюдений и обработки данных частного солнечного затмения 21.06.2020 г., полученных на радиотелескопах Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН: РТ-3 ($\lambda = 4.9$ см) и РТ-2 ($\lambda = 3.2$ см). Радиоданные сопоставляются с наблюдениями в оптическом и рентгеновском диапазонах. Отождествлены локальные радиоисточники на лимбе и на диске Солнца: эруптивный протуберанец и две полярные корональные дыры. Для обеих длин волн построены кривые изменения радиояркости невозмущенных областей Солнца от центра к лимбу, представлены радиокарты Солнца, вычислены: радиорadius, яркость и эффективная температура центра диска Солнца, максимальная яркость лимба, средняя яркость солнечного диска, среднее увеличение яркости к лимбу Солнца.

DOI: 10.31857/S0016794021060146

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечное затмение — это редкое и всегда актуальное астрономическое событие. Наблюдение солнечного затмения каждый раз позволяет получить уникальные наблюдательные данные во всех диапазонах электромагнитного спектра. Разрешающая способность затменных измерений теоретически может достигать значений $0.02'$ в сантиметровом диапазоне, и поэтому затменные наблюдения оказываются полезными при изучении размеров, положения и средней эффективной температуры локальных источников (ЛИ) на диске Солнца [Железняков, 1964]. Наблюдения солнечных затмений в радиодиапазоне проводились различными группами радиоастрономов [Velusamy et al., 2020; Юровский, 2012; Tan et al., 2009; Golubchina et al., 2008; Shanmugaraju and Umaphy, 1997; Baranov and Tsvetkov, 1992; Shu-Rong et al., 1991; De-Sheng and Shi-Guang, 1990]. Начиная с полного солнечного затмения 29.03.2006 г. [Шрамко и др., 2011], это четвертое частное затмение Солнца, наблюдаемое авторами на радиотелескопах Горной астрономической станции: 01.08.2008 г. [Шрамко и Гусева, 2011]; 04.01.2011 г. [Shramko and Guseva, 2012]; 20.03.2015 г. [Шрамко и Гусева, 2018]; 21.06.2020 г. Частное солнечное

затмение 21 июня 2020 г. — это второе затмение Солнца, которое наблюдалось авторами в период минимума цикла солнечной активности (СА). Предыдущее затмение Солнца 1 августа 2008 г. наблюдалось в минимуме 23-го цикла СА.

Цель данной работы — это исследование влияния различных ЛИ на интегральный поток радиоизлучения Солнца.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Радионаблюдения частного солнечного затмения 21 июня 2020 г. проводились в канале интенсивности, на двух радиотелескопах Кисловодской ГАС ГАО РАН: РТ-2 ($\lambda = 3.2$ см) и РТ-3 ($\lambda = 4.9$ см). В месте наблюдения ($\ell = 42^\circ 39' 45''$ E, $\varphi = 43^\circ 44' 29''$ N) максимальная фаза затмения составила $\Phi = 0.3$. Солнечное затмение началось рано утром, когда Солнце было низко над горизонтом, что повлияло на начало наблюдений. Начальная фаза покрытия на радиотелескопе РТ-2 ($\lambda = 3.2$ см) была прописана не полностью, так как помешал фундамент другого инструмента. Для отождествления ЛИ на диске Солнца в день наблюдения затмения использовались данные космического аппарата SDO (Solar Dynamics

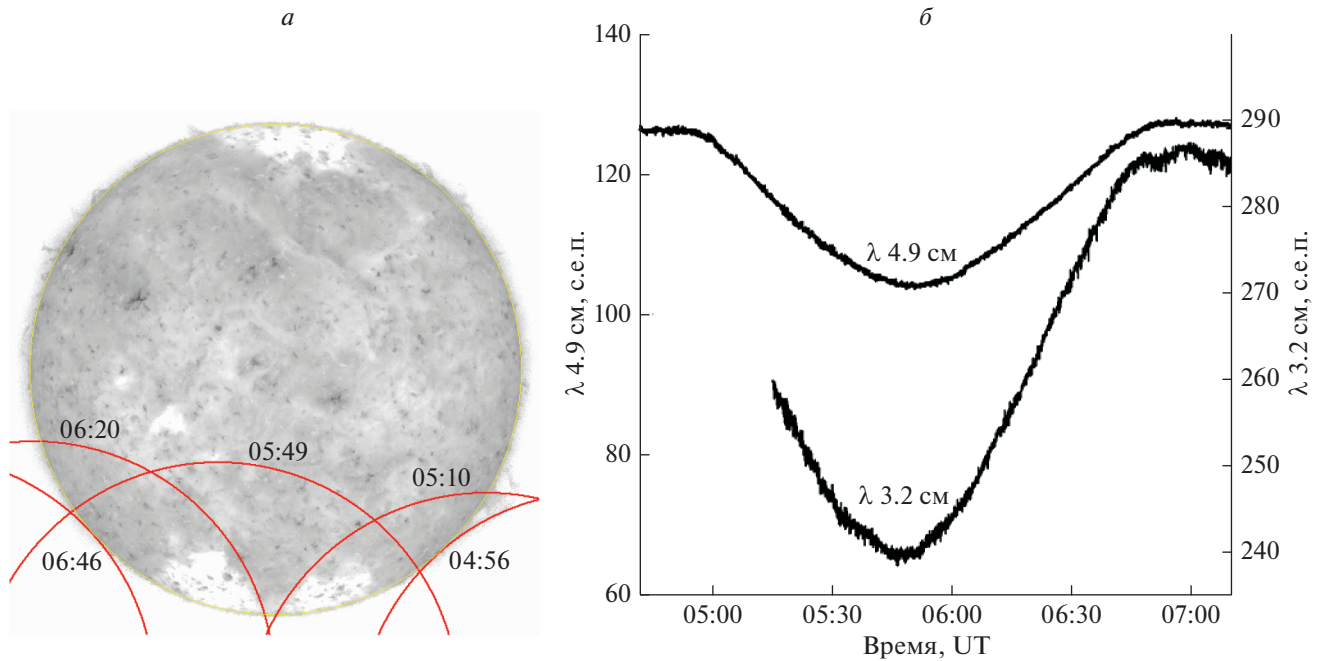


Рис. 1. (а) – Наложение фаз затмения на негатив комбинированного изображения SDO AIA 304 Å и 193 Å; (б) – радио-затменные кривые для $\lambda = 3.2$ см и $\lambda = 4.9$ см.

Observatory), спектрогелиограф AIA (Atmospheric Imaging Assembly). Контроль быстропротекающих процессов, пульсаций и колебаний высокой мощности во время затмения осуществлялся по данным спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellit). Во время данного частного солнечного затмения таких процессов не наблюдалось.

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЯ ЧАСТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 21.06.2020 г.

Для обработки результатов рассматриваемого солнечного затмения была использована методика, аналогичная той, которая применялась авторами для обработки затмений 2006, 2008, 2011, 2015 гг. [Шрамко и др., 2011; Шрамко и Гусева, 2011, 2018; Shramko and Guseva, 2012]. Результаты компьютерного моделирования данного солнечного затмения с указанием моментов (в UT) покрытия Луной диска Солнца, с использованием данных космического аппарата SDO, представлены на рис. 1а.

Полученные во время наблюдения радио-затменные кривые покрытия с двух радиотелескопов представлены на рис. 1б. Выявленные неоднородности на полученных кривых покрытия мы отождествили со следующими ЛИ: эруптивный протуберанец (П), расположенный на западном

лимбе Солнца; две полярные корональные дыры (КД) в южном полушарии (КД1, КД2).

Используя расчеты, сделанные при помощи модели [Шрамко и др., 2011; Шрамко и Гусева, 2011, 2018; Shramko and Guseva, 2012] можно определить теоретическое изменение интенсивности радиоизлучения от центра к лимбу, которое зависит от температуры верхнего слоя хромосферы и короны (рис. 2б). Эти расчеты и найденные источники были использованы при построении радиокарт Солнца для $\lambda = 3.2$ см и $\lambda = 4.9$ см (рис. 2а). Применяя эти карты и подбирая радиоинтенсивность найденных источников, мы добивались максимального соответствия наблюдаемой и теоретической затменных кривых Солнца (рис. 3). Необходимо было учитывать погодные условия наблюдения, во время затмения была переменная облачность. Учитывая вышеизложенные факты, мы добились хорошего согласования между наблюдаемыми и теоретическими кривыми (тонкие линии на рис. 3).

В таблице 1 приведены значения характеристик радиоизлучения Солнца, которые были получены из построенной модели. Потоки радиоизлучения ЛИ (рис. 4) в относительных (относительно радиоизлучения центра диска Солнца) и абсолютных единицах приведены в табл. 2.

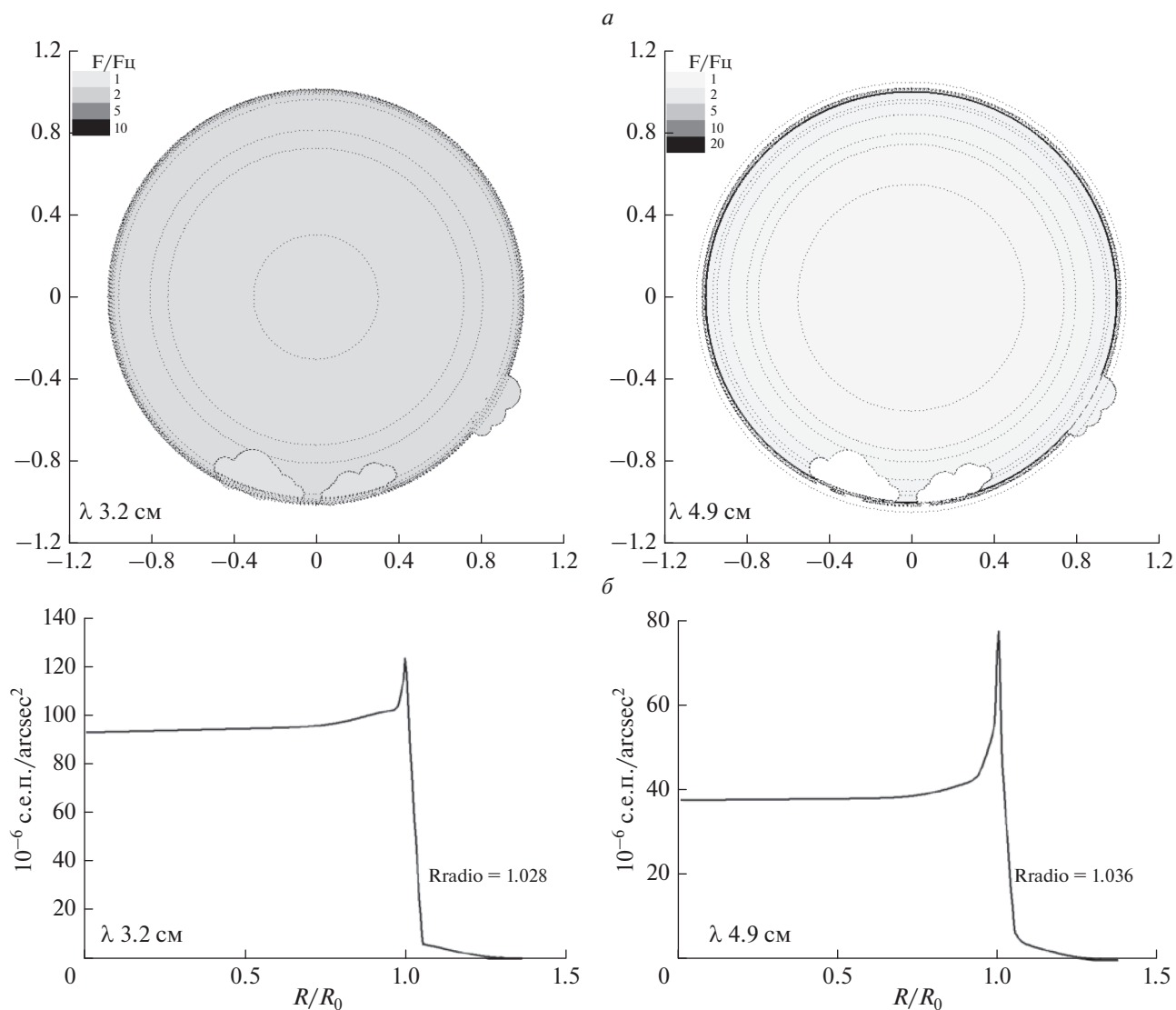


Рис. 2. (а) – Полученные радиокарты для $\lambda = 3.2$ см и $\lambda = 4.9$ см.; (б) – изменения радиояркости Солнца от центра к лимбу для $\lambda = 3.2$ см и $\lambda = 4.9$ см.

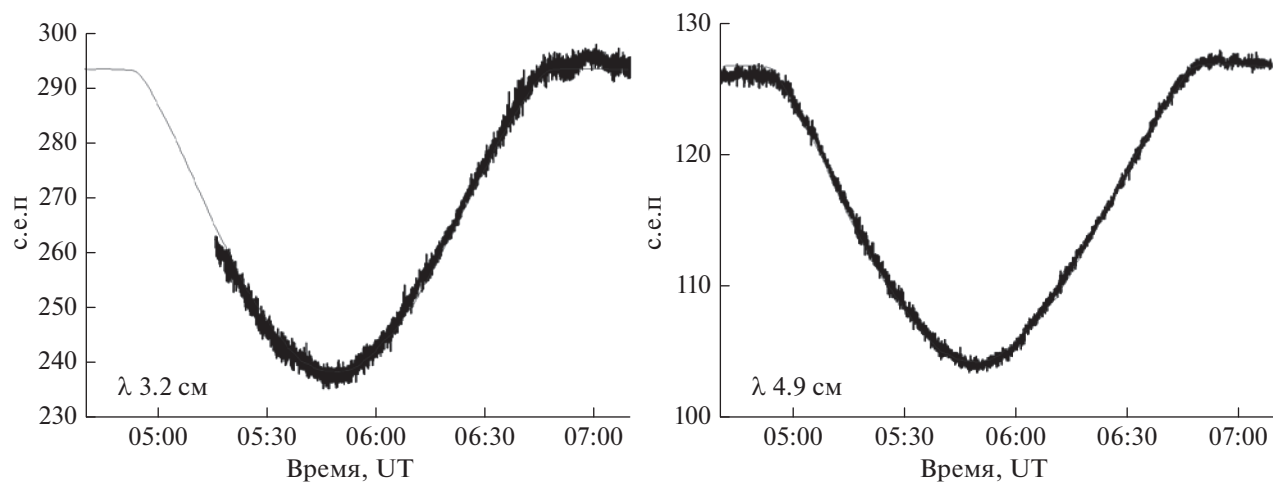


Рис. 3. Наблюдаемые и теоретические затменные кривые Солнца для $\lambda = 3.2$ см и $\lambda = 4.9$ см.

Таблица 1. Характеристики радиоизлучения Солнца, полученные из модели

Характеристики:	$\lambda = 3.2$ см	$\lambda = 4.9$ см
Радиорadius, R/R_0	1.028	1.036
Яркость центра, с.е.п./arcsec ²	92.8×10^{-6}	37.8×10^{-6}
Эффективная температура центра, K	0.978×10^4	1.377×10^4
Максимальная яркость лимба, с.е.п./arcsec ²	123.2×10^{-6}	77.8×10^{-6}
Средняя яркость диска, с.е.п./arcsec ²	95.5×10^{-6}	39.7×10^{-6}
Среднее увеличение яркости к лимбу ($I_{ro} - I_0$), с.е.п./arcsec ²	6.7×10^{-6}	1.9×10^{-6}

Таблица 2. Потoki радиоизлучения ЛИ в относительных (относительно радиоизлучения центра диска Солнца) и абсолютных единицах

Источники:	$\lambda = 3.2$ см		$\lambda = 4.9$ см	
	$F_{отн.}, F/F_{ц}$	$F_{абс.}, \text{с.е.п./arcsec}^2$	$F_{отн.}, F/F_{ц}$	$F_{абс.}, \text{с.е.п./arcsec}^2$
П	1.15	$(106 \pm 1) \times 10^{-6}$	1.25	$(47 \pm 1) \times 10^{-6}$
КД1	0.97	$(90 \pm 1) \times 10^{-6}$	0.6	$(23 \pm 1) \times 10^{-6}$
КД2	0.97	$(90 \pm 1) \times 10^{-6}$	0.6	$(23 \pm 1) \times 10^{-6}$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка радионаблюдений частного солнечного затмения 21.06.2020 г. на Кисловодской ГАС ГАО РАН дала несколько важных результатов. Анализ данных позволил обнаружить на кривых покрытия крупномасштабные неоднородности, которые мы отождествили со следующими радиоисточниками:

1) эруптивный протуберанец – П;

2) две южные полярные корональные дыры – КД1, КД2.

Расположение этих ЛИ представлены на рис. 4, а их потоки радиоизлучения в относительных и абсолютных единицах приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, наибольшую радиояркость для двух рассматриваемых длин волн имеет эруптивный протуберанец. Высота излучающей зоны в невозмущенной атмосфере Солнца различается для двух длин волн, но находится в пределах переходного слоя и нижней короны. Причем, для длины волны $\lambda = 4.9$ см излучающая зона расположена выше, чем для длины волны $\lambda = 3.2$ см. Поэтому в диапазоне $\lambda = 3.2$ см радиояркость диска Солнца выше, чем в диапазоне $\lambda = 4.9$ см, но корональные образования – мало контрастны. Радиоизлучение найденных полярных КД – пониженное. В силу вышеизложенных причин, в диапазоне $\lambda = 4.9$ см мы видим более контрастное понижение радиояркости КД относительно невозмущенных областей Солнца, чем в диапазоне $\lambda = 3.2$ см.

Существует аналогия между солнечным затмением 01.08.2008 г. и рассматриваемым затмением 21.06.2020 г. 1 августа 2008 г. на диске Солнца в северной полярной области наблюдалась протяженная, четко выраженная КД, которая также полностью покрывалась Луной во время затмения, и также при обработке, нами был отождествлен лимбовый источник – протуберанец. Наши расчеты модельной кривой покрытия для затмения 01.08.2008 г. показали, что область полярной КД имеет пониженное радиоизлучение на 25–40% и значительно уменьшает интенсивность яркого

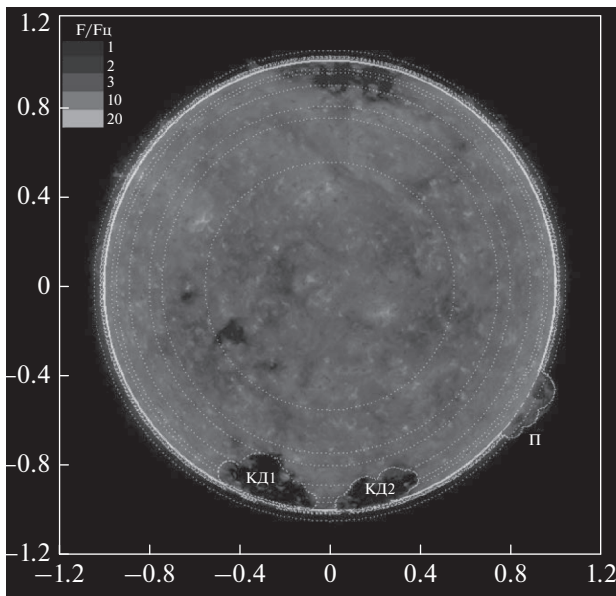


Рис. 4. Наложение комбинированного изображения SDO AIA 304 и 193 Å на радиокарту.

лимба полярной области на длине волны $\lambda = 4.9$ см [Шрамко и Гусева, 2011, 2012]. Наблюдения затмений в радиодиапазоне во время минимальной фазы СА интересовали и другие группы наблюдателей, так например, были проведены наблюдения солнечных затмений во время минимума предыдущих циклов СА: 01.08.2008 г. [Tan et al., 2009]; 24.10.1995 г. [Shanmugaraju and Umapathy, 1997]; 23.09.1987 г. [Shu-Rong et al., 1991; De-Sheng and Shi-Guang, 1990]. Во время минимальной фазы солнечного цикла влияние активных областей слабое, поэтому с помощью наблюдений затмений в радиодиапазоне можно изучать физические процессы, происходящие в невозмущенной солнечной атмосфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-02-00856 и программ Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет // М.: Наука. 560 с. 1964.
- 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. конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2010”. Ред. Степанов А.В. и Наговицын Ю.А. С.-Петербург: ГАО РАН. С. 459–462. 2011.
- Шрамко А.Д., Гусева С.А. Особенности радиоизлучения корональных дыр по затменным и внезатменным наблюдениям в период минимума солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 2. С. 154–162. 2012.
- Шрамко А.Д., Гусева С.А. Хромосферные и корональные источники в радиодиапазоне по наблюдениям на ГАС ГАО РАН частного солнечного затмения 20.03.2015 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 4. С. 479–483. 2018.
- Шрамко А.Д., Сенник В.А., Тлатов А.Г. Наблюдение солнечного затмения 29.III.2006 в радиодиапазоне на волнах 3.2 и 4.9 см // Космич. исслед. Т. 49. № 2. С. 99–104. 2011.
- Юровский Ю.Ф. Радиоизлучение невозмущенного Солнца и локальных источников на волнах 5, 10.7, 12 и 95 см по наблюдениям затмения 4 января 2011 г. в Крыму // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. Т. 108. № 1. С. 115–126. 2012.
- Baranov N.V., Tsvetkov L.I. Radio imagery of the sun at wavelengths of 3.5, 2.8, 2.25 and 1.95 CM during the period preceding the solar eclipse on July 11, 1991 // Sov. Astron. Lett. V. 18. № 5. P. 467–476. 1992.
- Golubchina O.A., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Bursov N.N., Tokhchukova S.H. Centimeter-wave radio emission of a high-latitude prominence // Astrophys. Bull. V. 63. № 1. P. 34–42. 2008.
- De-Sheng J., Shi-Guang L. Radio observational results of the annular solar eclipse on September 23, 1987 at 6 cm wavelength // Progress in Astronomy. V. 8. № 2. P. 173–175. 1990.
- Shanmugaraju A., Umapathy S. Radio spectrograph observations of the recent solar eclipse on October 24, 1995 // Kodaikanal Obs. Bull. V. 13. P. 147–149. 1997.
- Shramko A.D., Guseva S.A. Studying local sources in the radio range based on the partial solar eclipse of January 4, 2011, at the Mountain Astronomical Station Central Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences // Geomagn. Aeronomy. V. 52. № 7. P. 913–920. 2012.
- Shu-Rong Z., Xing-Feng Y., Zhi-Hai Q., Shu-Ying J., Pei L. Radio observation of the solar annular eclipse of September 23, 1987 at 3.2 cm wavelength // Chin. J. Space Sci. V. 11. № 1. P. 67–75. 1991.
- Tan B., Yan Y., Zhang Y., Tan C., Huang J., Liu Y., Fu Q., Chen Z., Liu F., Chen L., Ji G. Broadband radio spectral observations of the solar eclipse on 2008-08-01 and its implications on the quiet Sun atmospheric model // Sci. China Series G. V. 52. № 11. P. 1765–1772. 2009.
- Velusamy T., Kuiper T., Levin S., Dorsey R., Kreuser-Jenkins N., Leflang J. Goldstone Apple Valley Radio Telescope observations of 2012 solar eclipse: A multi-wavelength study of cm- λ gyroresonance emission from active regions // Publ. Astron. Soc. Pac. University of Chicago Press. V. 132. № 1015. 2020.