

УДК 523.947

Характеристики излучения полярных корональных дыр на Солнце в широком диапазоне радиоволн

О.А. Голубчина

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории, СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург 196140, Россия
golubchina_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 2 октября 2021 г.

Аннотация. В статье представлен краткий обзор основных результатов наблюдений радиоизлучения полярных корональных дыр на Солнце, полученных в широком диапазоне длин волн на различных радиотелескопах. Дан анализ результатов наблюдений на РАТАН-600 полярной корональной дыры (КД) в широком сантиметровом диапазоне длин волн (1.03–30.7) см. Полученные физические характеристики КД над северным полюсом Солнца сравниваются с характеристиками КД, расположенных в более низких широтах.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, радиоизлучение

1 Введение

Полярные корональные дыры (КД) всегда видны на полюсах Солнца в периоды минимальной солнечной активности, т. к. в это время преобладает вращательно ориентированная дипольная компонента магнитного поля. КД характеризуются как области пониженной температуры и плотности атмосферы Солнца. Это униполярные области с открытой конфигурацией магнитного поля. В дан-

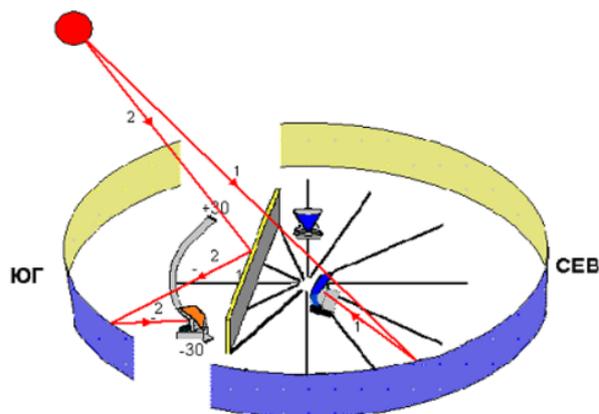


Рис. 1. Схема радиотелескопа РАТАН-600. (1 – падающий луч от Солнца при наблюдении на северо-восточном секторе РАТАН-600; 2 – при наблюдении на южном секторе РАТАН-600)

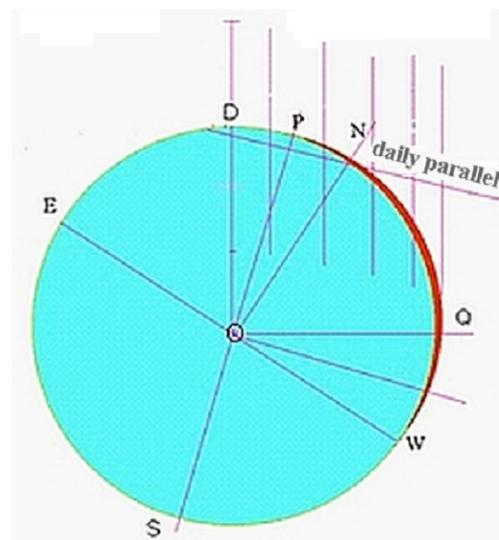


Рис. 2. Положение ножевой диаграммы направленности в разные моменты времени солнечного затмения при прохождении Солнца и Луны через ДНА РАТАН-600

ной работе мы приводим анализ результатов наблюдения радиоизлучения полярной КД во время максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 г. в режиме “Эстафеты” на северо-восточном секторе радиоастрономического телескопа Академии наук (РАТАН-600, рис. 1) на длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7)$ см (Golubchina et al., 2011). В момент максимальной фазы солнечного затмения открытая часть оптического диска Солнца составляла 0.2 % (рис. 2).

Таблица 1. Угловые размеры горизонтальной (ρ_h) и вертикальной (ρ_v) диаграммы направленности антенны РАТАН-600 на длинах волн наблюдений. Здесь λ – длина волны наблюдения

λ cm					
1.03	1.38	2.7	6.2	13	30.7
$(\rho_h \times \rho_v)$ arcmin					
0.4×17.3	0.6×19.3	1.2×19.4	2.6×25.0	5.7×35.8	13.4×84.4

Радиотелескоп РАТАН-600 имеет ножевую диаграмму направленности антенны (ДНА) (табл. 1).

2 Наблюдение солнечного затмения 29 марта 2006 года на РАТАН-600

Центр ДНА при наблюдении максимальной фазы солнечного затмения был смещен к северному полюсу Солнца относительно центра оптического диска Солнца по высоте на +15 угловых минут (рис. 2). Это позволило определить физические характеристики слабого излучения полярной КД над северным полюсом Солнца (Golubchina et al., 2011).

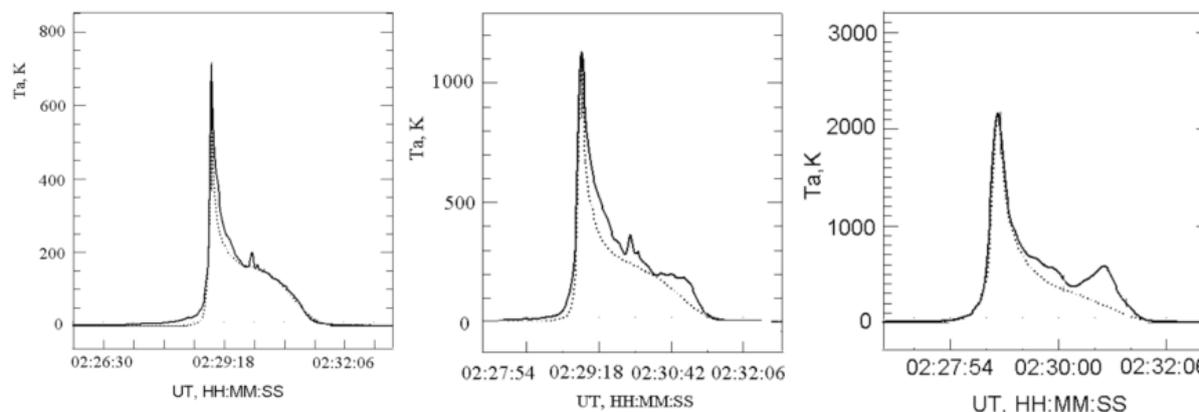


Рис. 3. Модельные (пунктирная линия) и полученные из наблюдений затмения (сплошная линия) кривые радиоизлучения Солнца и Луны на волнах $\lambda = 1.38$ см (левый график), 2.7 см (центральный график), 6.2 см (правый график)

Целью наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 на РАТАН-600 было определение распределения яркостных температур от лимба Солнца до расстояний $2 R_s$ от центра оптического диска Солнца (R_s – радиус оптического диска Солнца). Эта задача решалась с помощью создания полуэмпирических моделей Солнца и Луны. Яркостные температуры Солнца (Луны) задавались либо согласно литературным данным (Железняков, 1964; Соболев, 1967), либо подгонкой их методом проб и ошибок, либо решением уравнения переноса, либо комбинированием всех перечисленных методов (Golubchina et al., 2011). При наблюдении источника радиоизлучения сигнал радиоизлучения регистрируется в антенных температурах T_a . Антенные температуры моделей определяются подстановкой подобранных яркостных температур в уравнение (1) антенного сглаживания яркостных температур диаграммой направленности антенны:

$$T_a(\varphi_0) = \int T_b(\varphi_0) A(\varphi - \varphi_0) d\varphi, \quad (1)$$

где $T_b(\varphi_0)$ – яркостная температура источника радиоизлучения, $A(\varphi - \varphi_0)$ – вертикальная диаграмма направленности антенны, $\varphi - \varphi_0$ – угол отклонения от центра ДНА.

Для решения задачи необходимо подобрать яркостные температуры так, чтобы при их подстановке в уравнение (1) полученные антенные температуры были максимально близкими к наблюдаемым. Степень совпадения антенных температур модельного источника с антенными температурами реальной записи наблюдаемого источника радиоизлучения является оценкой качества моделирования. Рисунок 3 демонстрирует высокую степень совпадения реальной радиозаписи (сплошная линия) с модельной (пунктирная линия). Это означает, что созданная модель имеет достаточно хорошее качество. Таким образом, подобранные яркостные температуры, соответствующие антенным температурам реального наблюдения, являются найденным распределением яркостных температур над северной областью Солнца, где расположена полярная КД.

3 Сопоставление полученных модельных и реальных наблюдений

Распределение яркостных температур в области полярной КД Солнца было определено впервые в широком диапазоне сантиметровых длин волн согласно данным наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 на радиотелескопе РАТАН-600 (рис. 4).

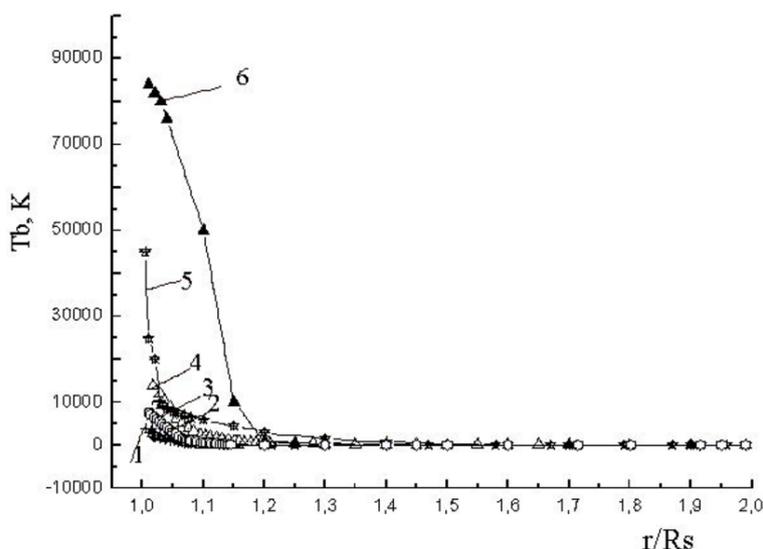


Рис. 4. Распределение яркостной температуры (T_b) с расстоянием от центра оптического диска Солнца (R_s) в полярной корональной области Солнца на волнах: 1 – 1.03 см; 2 – 1.38 см, 3 – 2.7 см, 4 – 6 см, 5 – 13 см, 6 – 30.7 см (Golubchina, 2021)

Резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной КД зарегистрировано на радиоволнах $\lambda = 13.0$ см на интервале расстояний от лимба Солнца (1.005–1.03) r/R_s и на волне $\lambda = 30.7$ см на интервале расстояний (1.01–1.15) r/R_s . Резкого уменьшения яркостных температур на коротких волнах $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7)$ см не обнаружено.

Для сравнения найденных из наблюдения затмения 29.03.2021 яркостных температур с яркостными температурами спокойного Солнца и крупных низкоширотных КД были использованы соответствующие данные, полученные в годы спокойного Солнца (1973–1976, 1984–1987 гг.) согласно наблюдениям на близких длинах волн на Большом Пулковском радиотелескопе (БПР) и РАТАН-600 (Borovik et al., 1990; Borovik, 1994). На рисунке 5 приведены распределения найденных из наблюдения солнечного затмения яркостных температур интенсивности радиоизлучения на волне 6.2 см и распределение яркостных температур интенсивности радиоизлучения спокойного Солнца по данным работы Borovik et al. (1990) на волне 4.0 см. Яркостные температуры, определенные по данным

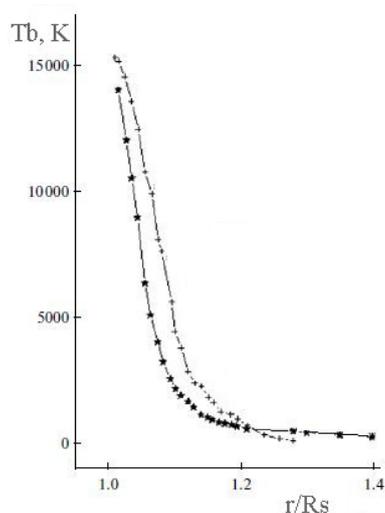


Рис. 5. Распределение яркостной температуры в солнечной короне на интервале расстояний (1–1.4) r/R_s . Здесь (*) обозначает значения яркостных температур (T_b , K) полярной КД, которые были обнаружены при наблюдении солнечного затмения 29.03.2006 на $\lambda = 6.2$ см; (+) обозначает значения (T_b , K) (Borovik, 1994) для спокойного Солнца на близкой длине волны 4.0 см

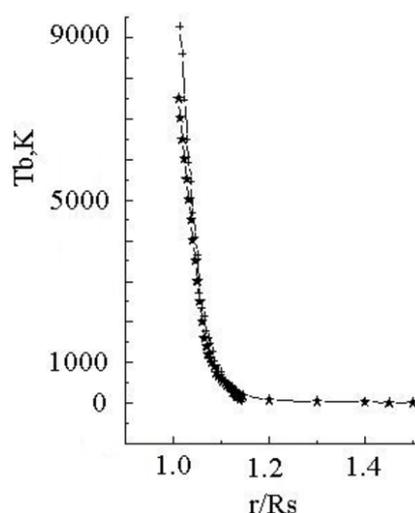


Рис. 6. Распределение яркостной температуры Солнца, полученной во время солнечного затмения 29.03.2006 г. (*) и яркостной температуры спокойного Солнца (+) на $\lambda = 2.7$ см

наблюдений солнечного затмения на волне 6.2 см, меньше, чем яркостные температуры на волне 4 см для спокойного Солнца, следовательно, полярную КД 29.03.2006 можно визуализировать на волне 6.2 см.

Сравнение распределения яркостных температур полярной КД на волне 2.7 см с распределением яркостных температур спокойного Солнца на волне 2.7 см свидетельствует о полном совпадении яркостных температур (рис. 6). Это подтверждает тот факт, что на волне 2.7 см полярная КД не видна (Golubchina, 2021).

Таблица 2. Яркостные температуры (T_b , K) спокойного Солнца (S1), средние полуэмпирически согласованные модельные данные низкоширотной КД (CH1) на фоне спокойного Солнца и полярной КД (CH2) на близких длинах волн. Здесь $\lambda^{(1)}$ – данные работы Borovik et al. (1990); $\lambda^{(2)}$ – результаты наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на ПАТАН-600, r/R_s – нормированное расстояние от центра солнечного диска до точек измерения, ближайших к солнечному лимбу во время солнечного затмения

$\lambda^{(1)}$ (cm):	6	15	31.6
(CH1); T_b , 10^3 K:	19.6	39	86
(S1); T_b , 10^3 K:	24.7	63	174
$\lambda^{(2)}$ (cm):	6.2	13	30.7
(CH2); T_b , 10^3 K:	14	45	84
r/R_s :	1.017	1.005	1.01

На фоне спокойного Солнца в годы минимума солнечной активности могут существовать низкоширотные КД. В этом случае линии открытого магнитного поля организуют КД либо в результате конвективных движений в фотосфере, либо пересоединением силовых линий открытого магнитного поля с замкнутыми силовыми линиями (Fisk, Schwadron, 2001; Abramenko et al., 2006).

Для того чтобы выяснить, существует ли зависимость термодинамических параметров плазмы КД в период минимальной солнечной активности от их локализации на Солнце, нами был проведен

сравнительный анализ. В таблице 2 приведены яркостные температуры радиоизлучения спокойного Солнца, усредненные яркостные температуры больших низкоширотных КД по данным наблюдений в периоды спокойного Солнца (Borovik et al., 1990) и яркостные температуры полярной КД (29.03.2006) на близких волнах сантиметрового диапазона.

Яркостные температуры низкоширотных КД (СН1) на фоне спокойного Солнца и яркостные температуры полярной КД (СН2) на волнах $\lambda > 5$ см меньше яркостных температур спокойного Солнца (S1). Это сравнение указывает на практически равные по величине яркостные температуры низкоширотных КД и полярной КД в точках, расположенных около солнечного лимба на близких волнах. Это означает, что свойства КД не зависят от их месторасположения на Солнце, следовательно, и от механизма организации КД в период минимальной солнечной активности (Golubchina, 2017).

4 Дискуссия

Анализ результатов наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 на северо-восточном секторе РАТАН-600 проводился с использованием наблюдательных и теоретических данных, опубликованных различными авторами. В многочисленных работах, связанных с исследованием микроволнового излучения КД на Солнце, отмечается, что КД на коротких волнах сантиметрового диапазона не видны. Возможная причина этого явления, а также проблема усиления микроволнового радиоизлучения полярных КД на Солнце, изучались многими исследователями.

Наблюдения полярных корональных дыр впервые были выполнены в КрАО на волнах 8.2 и 13.5 мм (1974–1977 гг.) на радиотелескопе РТ-22 и на Culgoora Radioheliograph (Австралия) на волне 3.5 мм на параболаиде с диаметром 4 м (Babin et al., 1976; Efanov et al., 1980). В КрАО наблюдения полярных КД были выполнены на широтах вплоть до 80° . На больших широтах наблюдения в радиодиапазоне невозможны из-за большого градиента температуры вблизи лимба Солнца. Обнаружено, что полярные КД – это области повышенной интенсивности радиоизлучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Так, на $\lambda = 8.2$ мм превышение над уровнем спокойного Солнца $dT = 1500$ К, а на $\lambda = 13.5$ мм – $dT = 2200$ К. Значения $dT = 240$ – 560 К получены согласно аналогичным измерениям, выполненным в Японии на радиотелескопе диаметром 45 м на $\lambda = 8.3$ мм. Между тем на волне $\lambda = 3.1$ мм повышение интенсивности над уровнем спокойного Солнца не было обнаружено (Shimabukuro et al., 1975).

На связь усиления миллиметрового излучения полярной КД и усиления униполярного магнитного поля внутри КД было обращено внимание в работе Kosugi et al. (1986). В этой работе результаты наблюдений на 45-метровом радиотелескопе Нобейма на волнах 8.3 мм и 3.1 мм (1984 г.) показали уярчение (3–7) % на $\lambda = 8.3$ мм вблизи полюсов на широтах $> 65^\circ$.

В исследовании причины усиления интенсивности радиоизлучения полярной КД на коротких волнах активно использовались наблюдения солнечного радиоизлучения на $\lambda = 1.76$ см, полученные на радиогелиографе Нобейма, и данные крайнего ультрафиолетового излучения EUV со спутника Solar Heliospheric Observatory (SOHO) (Gopalswamy et al., 1999). Авторы пришли к выводу, что радиоусиление обусловлено “усиленными однополярными магнитными областями, лежащими в основе корональной дыры”; структура микроволнового уярчения состоит из сглаженного и компактного компонента. Точечные источники связаны со взаимодействием элементов разной полярности. Чтобы понять усиление радиоизлучения на 17 ГГц вблизи полюсов Солнца, в работах Selhorst et al. (2005, 2010) были рассмотрены различные модели с учетом солнечных спикул, расположенных случайным образом, а также с учетом спикул и небольших областей без спикул (межспикульные дыры), которые на картах наблюдений на частоте 17 ГГц видны как яркие пятна в районе полюса. Авторы обнаружили, что усиленное радиоизлучение на $\lambda = 1.76$ см неоднородно с яркими пятнами вблизи лимба. Межспикульные дыры расположены над полярными факелами, а яркие полярные пятна, наблюдаемые на $\lambda = 1.76$ см, расположены близко к областям полярных факелов. Эти модели хорошо согласуются с результатами наблюдений полярных уярчений на $\lambda = 1.76$ см. Согласно наблюдениям в Metsahovi Radio Observatory (Финляндия) и на $\lambda = (8, 3.4, 3.5)$ мм, наблюдениям в белом свете (Кисловодск), в ультрафиолете (EUV SOHO), в мягком рентгене (0.25–4 кэВ) авторы пришли к заключению, что увеличение интенсивности радиоизлучения полярных КД может быть связано с появлением полярных факелов, плюмов, ярких точек и сильных магнитных потоков (Pohjolainen, 2000; Riehkainen et al., 2001). Иногда осветление в КД необъяснимо. Shibasaki (2013) предположил,

что уярчение полярных корональных дыр может быть обусловлено влиянием нагретой атмосферы, которая вытекает вдоль униполярного магнитного поля открытой структуры. В работе Pasachoff (2007) отмечено наблюдение яркого плюма во время солнечного затмения 29.03.2006.

Основываясь на результатах перечисленных работ, можно предположить, что более высокие яркостные температуры полярной КД на волнах (1.03, 1.38, 2.7) см и, как следствие, отсутствие видимости КД на этих волнах может быть вызвано присутствием полярных факелов, плюмов и униполярных магнитных полей вблизи северного полюса Солнца.

Анализ полученного распределения яркостных температур полярной КД проводился также с привлечением результатов более ранних наблюдений крупных низкоширотных корональных дыр и спокойного Солнца на БПР и РАТАН-600 в стандартном режиме наблюдений в годы спокойного Солнца (Golubchina, 2021). Результаты сравнений подтвердили реальную регистрацию полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца 29.03.2006 на волнах (6.2, 13.0, 30.7) см и отсутствие видимости КД на волнах (1.03, 1.38, 2.7) см.

Идентичность характеристик экваториальных и полярных КД была исследована по данным наблюдений КД в белом свете на коронографе спутника Skylab (Munro, Jackson, 1977). Авторы пришли к выводу, что “физические условия внутри корональной дыры не зависят от индивидуальной локализации на Солнце”. Результаты наблюдений полного солнечного затмения 29.03.2006 на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн подтвердили этот вывод (Golubchina, 2021).

5 Заключение

1. Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 на РАТАН-600 позволило **впервые** определить распределение яркостных температур над Северным полюсом Солнца в пределах полярной КД на Солнце в широком диапазоне сантиметровых длин волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7)$ см на интервале расстояний (1.005–2.0) R_s от центра оптического диска Солнца.
2. Обнаружено резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной КД на сантиметровых длинах волн $\lambda \geq 6$ см вблизи солнечного лимба, что подтвердило реальную регистрацию полярной КД над Северным полюсом Солнца.
3. Полярная КД не видна на коротких сантиметровых длинах волн $\lambda = (1.03, 1.38, 2.7)$ см.
4. Совпадение яркостных температур полярной КД и больших низкоширотных КД на близких длинах волн в Северном полушарии Солнца свидетельствует об идентичности температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от механизма их формирования в период минимума солнечной активности.

Литература

- Железняков В.В., 1964. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука. [Zheleznyakov V.V., 1964. Radioizluchenie Solntsa i planet. M.: Nauka. (In Russ.)]
- Соболев В.В., 1967. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука. [Sobolev V.V., 1967. Kurs teoreticheskoi astrofiziki. M.: Nauka. (In Russ.)]
- Abramenko V.I., Fisk L.A., Yurchyshyn V.B., 2006. *Astrophys. J.*, vol. 641, no. 1, pp. L65–L68.
- Babin A.N., Gopasiuk S., Efanov V.A., et al., 1976. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 55, pp. 3–13. (In Russ.)
- Borovik V.N., Kurbanov M.S., Livshits M.A., et al., 1990. *Sov. Astron.*, vol. 34, no. 5, pp. 522–530.
- Borovik V.N., 1994. In Belvedere G., Rodono M., Simnett G.M. (Eds), *Advances in Solar Physics. Lecture Notes in Physics*, Berlin, Heidelberg: Springer, vol. 432, pp. 185–190.
- Efanov V.A., Moiseev I.G., Nesterov N.S., et al., 1980. In Kundu M.R. and Gergely T.E. (Eds), *Radio Physics of the Sun, Proceedings of the Symposium*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., vol. 86, pp. 141–144.
- Fisk L.A., Schwadron N.A., 2001. *Astrophys. J.*, vol. 560, no. 1, pp. 425–438.
- Golubchina O.A., Korzhavin A.N., Tokhchukova S., 2011. *Astrophys. Bull.*, vol. 66, no. 4, pp. 488–495.
- Golubchina O.A., 2017. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 57, no. 8, pp. 964–967.
- Golubchina O.A., 2021. *Astron. Rep.*, vol. 65, no. 4, pp. 322–330.
- Gopalswamy N., Shibasaki K., Thompson B.J., DeForest C., and 2 more, 1999. *Geophysical Research*, vol. 104, no. A5, pp. 9767–9779.

- Kosugi T., Ishiguro M., Shibasaki K., 1986. Publ. Astron. Soc. Japan., vol. 38, no. 1, pp. 1–11.
- Munro R.H., Jackson B.V., 1977. Astrophys. J., vol. 213, no. 1, pp. 874–886.
- Pasachoff J.M., Rušin V., Druckmüller M., et al., 2007. Astrophys. J., vol. 665, no. 1, pp. 824–829.
- Pohjolainen S., 2000. Astron. Astrophys., vol. 361, pp. 349–358.
- Riehkainen A., Urpo S., Valtaoja E., et al., 2001. Astron. Astrophys., vol. 366, no. 1, pp. 676–685.
- Selhorst C.L., Silva A.V.R., Costa J.E.R., 2005. Astron. Astrophys., vol. 440, no. 1, pp. 367–371.
- Selhorst C.L., Giménez de Castro C.G., Varela Saraiva A.C., et al., 2010. Astron. Astrophys., vol. 509, p. A51.
- Shibasaki K., 2013. Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 65, no. 1, p. S17.
- Shimabukuro F.L., Wilson W.J., Mori T.T., et al., 1975. Solar Phys., vol. 40, no. 2, pp. 359–370.

Characteristics of the radiation of polar coronal holes on the Sun in a wide range of radio waves

O. Golubchina

St. Petersburg Branch of the Special Astrophysical Observatory, St. Petersburg 196140, Russia
golubchina_olga@mail.ru

Abstract. The paper presents a brief overview of the main results of observations of the radio emission of polar coronal holes on the Sun obtained in a wide range of wavelengths with various radio telescopes. We analyze the results of observations of the polar coronal hole (CH) with RATAN-600 in a wide centimeter wavelength range of (1.03–30.7) cm. The obtained physical characteristics of the CH above the north pole of the Sun are compared with the characteristics of the CHs located at lower latitudes.

Key words: Sun, coronal holes, radio emission