

---

---

**СПОКОЙНАЯ КОРОНА СОЛНЦА:  
ЕЖЕДНЕВНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ДЛИНАХ ВОЛН 8.8–10.7 см**  
**QUIET SOLAR CORONA: DAILY IMAGES AT 8.8–10.7 cm WAVELENGTHS**

---

---

**А.Т. Алтынцев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru*

**М.В. Глоба**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru*

**Н.С. Мешалкина**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru*

**A.T. Altyntsev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru*

**M.V. Globa**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru*

**N.S. Meshalkina**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru*

---

---

**Аннотация.** В работе обсуждаются результаты тестовых испытаний решетки диапазона 3–6 ГГц Сибирского радиогелиографа (СРГ). Проверен метод калибровки яркостных температур изображений с помощью известных в литературе измерений яркостной температуры спокойного Солнца в минимуме между 20 и 21 циклами солнечной активности. Полученные зависимости от времени интегрального потока Солнца на 2.8 ГГц подобны измеренным в обсерватории Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO), однако абсолютные значения потоков СРГ занижены относительно потоков DRAO на 10–15 %.

Спектральная плотность микроволнового потока Солнца на частоте 2.8 ГГц, так называемый индекс  $F_{10.7}$ , является одним из основных индексов солнечной активности, используемых в качестве входных параметров в моделях ионосферы Земли. В работе рассмотрена связь величин полных потоков радиоизлучения с изменениями структуры источников на диске Солнца в течение интервала длительностью 50 дней. В период ежедневных наблюдений с 1 сентября по 20 октября 2021 г. количество активных областей на диске менялось в несколько раз, а величина интегральной плотности потока на частоте 2.8 ГГц — до 1.5 раз. В работе определены относительные вклады в интегральный поток тормозного излучения прилиम्бовых уярчений и факельных площадок, а также магнитотормозного излучения в магнитных полях активных областей. Проведено сравнение измеренных яркостных температур радиокарт СРГ с модельными, рассчитанными по данным наблюдений крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ-излучения) на телескопе AIA/SDO. Результаты анализа могут быть использованы для организации на СРГ регулярных измерений скорректированного прокси-индекса солнечной активности  $F_{10.7}$ , в котором исключен вклад гирорезонансного излучения.

**Ключевые слова** полный поток Солнца, индекс  $F_{10.7}$ .

---

---

**Abstract.** We discuss results of test observations of the 3–6 GHz range array of the Siberian Radio Heliograph (SRH). A method for calibrating brightness temperatures of images was verified using measurements of the brightness temperature of the quiet Sun at a minimum between solar activity cycles 20 and 21 known in the literature. The obtained time dependences of the integral solar flux at 2.8 GHz are similar to those measured at the Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO), but the absolute values of SRH fluxes are lower relative to the DRAO fluxes by 10–15 %.

The spectral density of the solar microwave flux at a frequency of 2.8 GHz, the so-called  $F_{10.7}$  index, is one of the main solar activity indices used as input parameters in models of Earth's ionosphere. The paper considers the relationship between total radio fluxes and changes in the structure of sources on the solar disk during an interval of 50 days. During the period of daily observations from September 1 to October 20, 2021, the number of active regions on the disk changed several times, and the integral flux density at 2.8 GHz changed up to 1.5 times. We determine the relative contributions to the integral flux of bremsstrahlung of near-limb brightenings and plage regions, as well as bremsstrahlung in magnetic fields of active regions. The measured brightness temperatures of SRH radio maps are compared to the model temperatures calculated from observations of extreme ultraviolet emission (EUV) with the AIA/SDO telescope. The results of the analysis can be used to organize regular measurements of the corrected solar activity proxy index  $F_{10.7}$  at SRH, in which the contribution of gyroresonance emission is excluded.

**Keywords:** total solar flux,  $F_{10.7}$  index.

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения потока Солнца в дециметровом диапазоне наиболее востребованы в физике солнечно-земных связей. Это связано с тем, что свойства верхней атмосферы Земли (ионосферы—термосферы) существенно зависят от высокоэнергичного потока крайнего ультрафиолетового излучения Солнца (КУФ-излучения, 100–1210 Å) и даже от более коротковолнового, генерируемого в солнечной атмосфере. КУФ-излучение нагревает и ионизирует атмосферу Земли, но не достигает ее поверхности. Поскольку регистрация КУФ-излучения наземными средствами невозможна, для оценки его потока используется значение спектральной плотности потока излучения спокойного Солнца на частоте 2.8 ГГц, для которого земная атмосфера практически прозрачна. Высокая степень корреляции потока микроволнового излучения с интенсивностью КУФ-излучения позволяет использовать его как прокси-индекс солнечной активности, известный как индекс  $F10.7$ . Высокая степень корреляции индекса с солнечным КУФ-излучением физически обусловлена генерацией обоих излучений в корональной плазме [Swarup et al., 1963]. Значение индекса принято равным спектральной плотности потока спокойного (в интервалы времени без вспышек) излучения Солнца, измеренного на Земле на частоте 2.8 ГГц в солнечных единицах потока [ $10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>Гц)]. В качестве эталонных используются измерения  $F10.7$  в канадских обсерваториях, где достигнута точность абсолютных измерений около процента, и которые дополняются ежедневно с 1947 г. по настоящее время [Covington, 1969; Tapping, 1987]. Этот индекс является основным входным параметром в современных моделях ионосферы и термосферы [Jacchia, 1971; Bilitza, Reinisch, 2008] даже если доступны данные прямых наблюдений КУФ [Tobiska et al., 2008].

Известно (см. обзоры [Kundu, 1965; Krueger, 1979]), что тепловые источники микроволнового излучения спокойного Солнца можно разделить на три класса: фоновое излучение хромосферы и вышележащей короны, излучение факельных площадок умеренной интенсивности и яркое излучение из пятен активных областей. Наиболее точные измерения спектра яркостных температур в центральной части солнечного диска были выполнены в минимуме солнечной активности между 21-м и 22-м циклами солнечной активности (1986–1987 гг.) и опубликованы в работах [Zirin et al., 1991; Vorovik et al., 1992]. Яркостная температура спокойного Солнца на 2.8 ГГц была определена как  $(27.1 \pm 1.1)10^3$  К. Было показано, что фоновая компонента ( $65.2 \pm 2.0$  с.е.п.) генерируется в однородной оптически толстой хромосфере с температурой 11000 К и в вышележащей оптически тонкой короне с температурой  $\sim 10^6$  К.

До сих пор обсуждаются вопросы об относительном вкладе других источников в переменность индекса  $F10.7$  [Schonfeld et al., 2017]. В некоторых исследованиях утверждается, что переменная микроволновая компонента представляет собой оптически тонкое тормозное излучение факельных площа-

док [Felli et al., 1981; Tapping, DeTracey, 1990; Tapping et al., 2003]. В других предполагается, что, в первую очередь, на величину индекса влияет изменение вклада гирорезонансного излучения в сильных магнитных полях пятен активной области [Schmahl, Kundu, 1995, 1998]. В одной из недавних публикаций [Dudok de Wit et al., 2014] делается заключение, что гирорезонансная компонента излучения может отвечать за 90 % изменчивости индекса. Неопределенность в причинах изменчивости  $F10.7$  заставляет использовать в качестве индекса не актуальные значения, а усредненные за десятки дней измерения, поскольку в этом случае коэффициент его корреляции с КУФ-излучением становится выше из-за уменьшения вклада нетормозной компоненты радиоизлучения.

Для разрешения неоднозначности в причине изменчивости потока необходимо уметь выделять излучение отдельных источников, т. е. требуется визуализация солнечного диска. Первая попытка определить распределение яркостной температуры по диску спокойного Солнца на 2.8 ГГц была сделана в работе [Christiansen, Warburton, 1955] во время минимума солнечной активности 1952–1954 гг. С помощью одномерных сканов диска Солнца были обнаружены экваториальные уярчения около лимбов и потемнения в полярных областях.

Двумерные изображения диска Солнца на частоте 2.8 ГГц были получены только через полвека с помощью Allen Telescope Array (ATA) [Saint-Hilaire et al., 2012]. Специфическая трудность картографирования солнечного диска связана с необходимостью совмещения широкого поля зрения телескопа (более 30 угл. мин.) с высоким пространственным разрешением ( $\sim 10$  угл. сек). При разрешении ATA  $\sim 1.6$  угл. мин на 2.8 ГГц ясно наблюдались экваториальные прилимовые уярчения. Наблюдения на ряде частот в диапазоне 1.43–6 ГГц в интенсивности и поляризации позволили также идентифицировать источники гирорезонансного излучения. Был сделан вывод, что гирорезонансное излучение может в некоторых случаях давать основной вклад в излучение активной области.

Позднее несколько изображений диска спокойного Солнца с пространственным разрешением до 35 угл. сек были получены методом мозаики в наблюдениях Jansky Very Large Array (VLA). Во время наблюдений на диске находилось 11 активных областей. Однако, несмотря на большое количество активных областей, вклад гирорезонансного излучения в интегральное излучение Солнца не превышал 10 с.е.п., а относительный вклад в переменную составляющую индекса  $F10.7$  был не более 8 % [Schonfeld et al., 2015].

Во время последнего минимума солнечной активности публиковались изображения полного диска Солнца на шести частотах, получаемые с помощью данных 13-антенного радиоинтерферометра EOVSА, накапливаемых в течение светового дня [Gary et al., 2020; <http://ovsa.njit.edu/SynopticImg/eovsamedia/eovsa-browser>]. Пространственное разрешение на 3.0 ГГц достигало 20 угл. сек и оказалось достаточным для

наблюдений экваториального лимбового уярчения с яркостными температурами выше  $50 \cdot 10^3$  К, а также выделения на фоне диска ярких факельных площадей и пятенных источников.

В разделе 1 обсуждаются характеристики Сибирского радиогелиографа и метод калибровки яркостной температуры. В разделе 2 проведен анализ ежедневных наблюдений на трех частотах в диапазоне 3–6 ГГц в течение 50 дней. В этом разделе также сравниваются измеренные радиокарты с модельными распределениями яркостной радиотемпературы, полученными по данным наблюдений КУФ-излучения на телескопе AIA/SDO. Результаты обсуждаются в разделе 3 и заключении.

## 1. СИБИРСКИЙ РАДИОГЕЛИОГРАФ: ДИАПАЗОН 3–6 ГГц

Сибирский радиогелиограф находится в Радиоастрофизической обсерватории (РАО) ИСЗФ СО РАН и предназначен для регулярных наблюдений Солнца в диапазоне частот 3–24 ГГц [Lesovoi et al., 2012; Алтынцев и др., 2020]. Начиная с 2021 г. на радиогелиографе выполняются тестовые наблюдения. В данной работе использовались данные T-образной решетки диапазона 3–6 ГГц, состоящей из эквидистантно расположенных 129 антенн диаметром 3 м. Для работы выбраны данные измерений на частотах 2.8, 3.1, 3.4 ГГц. Калибровка данных, построение и «чистка» изображений производятся с помощью программного обеспечения, разработанного в ИСЗФ СО РАН, а также с помощью стандартного программного обеспечения для работы с радиоинтерферометрическими данными CASA [CASA Team et al., 2022]. Диаграммы направленности СРГ можно описывать овалами, длины осей которых обратно пропорциональны частоте, а углы ориентации и размеры зависят от сезона и местного времени наблюдений. В работе обсуждаются данные наблюдений, полученные с 1 сентября по 20 октября 2021 г. в моменты времени, близкие к местному полудню. Для измерений выбирались моменты времени около 03 UT без всплесков микроволнового излучения.

Калибровка яркостных температур на изображениях СРГ производилась с помощью сравнения гистограмм попиксельной яркости диска Солнца и неба. Разница максимумов гистограмм на данной частоте нормировалась на соответствующее значение яркостной температуры спокойного Солнца, приведенное в работах [Zirin et al., 1991; Borovik et al., 1992]. Участкам неба присваивалось нулевое значение яркостной температуры, а разнице максимумов гистограмм — значение яркостной температуры спокойного Солнца из статьи [Zirin et al., 1991], полученное для центральной части диска спокойного Солнца для соответствующей частоты. Для калибровки 2.8 ГГц принималось, что максимум попиксельной диаграммы соответствует температуре  $27.1 \cdot 10^3$  К, а на частотах 3.1 и 3.4 ГГц —  $24.9 \cdot 10^3$  К и  $23.0 \cdot 10^3$  К соответственно. В работе использовались наблюдения в обеих круговых поляризациях (R и L).

Радиокарты СРГ на частоте 2.8 ГГц сравнивались с картами, рассчитанными по данным КУФ-излучения, полученным с помощью SDO/AIA. Дифференциальная

мера эмиссии каждого пикселя изображения вычислялась с помощью алгоритма SPARSE [Su et al., 2018]. Входными данными являются EUV-карты на шести каналах (94, 131, 171, 193, 211, 335 Å) для заданного момента времени. Яркостные температуры определялись из дифференциальной меры эмиссии с помощью библиотеки GRFF\_DEM\_Transfer\_64.dll, доступной по ссылке [https://github.com/kuznetsov-radio/GRFF/tree/master/Binaries] (детали см. [Fleishman et al., 2021]).

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

В работе использовалась последовательность ежедневных изображений Солнца на частотах 2.8, 3.1, 3.4 ГГц. Анализируемый период наблюдений начался 1 сентября 2021 г., и 50 дней соответствовали солнечным оборотам CR2248 и CR2249. На рис. 1 показаны изображения диска Солнца в дни с наиболее отличающимися интегральными потоками: 17 сентября (верхняя панель, 62.3 с.е.п.) и 8 сентября (нижняя панель, 95.1 с.е.п.). На панелях *a*, *d* показаны магнитограммы продольного магнитного поля; *b*, *e* — карты яркостных температур СРГ на частоте 2.8 ГГц в интенсивности (R+L); на панелях *в*, *ж* выделены белым цветом маски с областями, где яркостные температуры  $T_{br} > 35 \cdot 10^3$  К, а контурами показаны области со степенью поляризации выше 5%. На панелях *г*, *з* показаны результаты моделирования радиокарт на частоте 2.8 ГГц по данным КУФ-излучения.

Временные профили интегральных потоков Солнца, рассчитанных по радиокартам, показаны на рис. 2. На панели *a* приведены поток  $F_{2.8}$  и временной профиль индекса  $F10.7$ , измеренный в канадской обсерватории Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO) [http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily]. С учетом разницы во времени измерений между DRAO и СРГ (около 15 ч) временные профили подобны, но величины потоков СРГ систематически занижены примерно на 10%. Профили потока на частотах 3.1 и 3.4 ГГц, показанные на панели *б*, подобны зависимости от времени  $F_{2.8}$ . Двугорбую форму профилей естественно связать с оборотами Солнца с периодом около 25 сут. На панели *в* показаны число активных областей и число вспышек, приведенные на сайте SolarMonitor [https://www.solarmonitor.org] для данного дня. Видно, что изменения  $F10.7$  во времени естественно связать с изменением числа активных областей на диске. Корреляция потока  $F_{2.8}$  со вспышками не наблюдается, поскольку измерения потоков проводились в моменты времени без вспышек. Отметим, что наблюдались в основном вспышки рентгеновского класса C, кроме трех вспышек рентгеновского класса M 23 сентября 2021 г.

Взаимосвязь измерений потока в обсерватории DRAO ( $F10.7$ ) и СРГ на частотах 2.8, 3.1 и 3.4 ГГц близка к линейной во всем диапазоне величин потоков (рис. 3). Результаты линейной корреляции плотностей потоков показаны сплошными линиями, наклон которых растет с частотой приема. Линейный коэффициент корреляции превышает 0.8 на всех частотах.

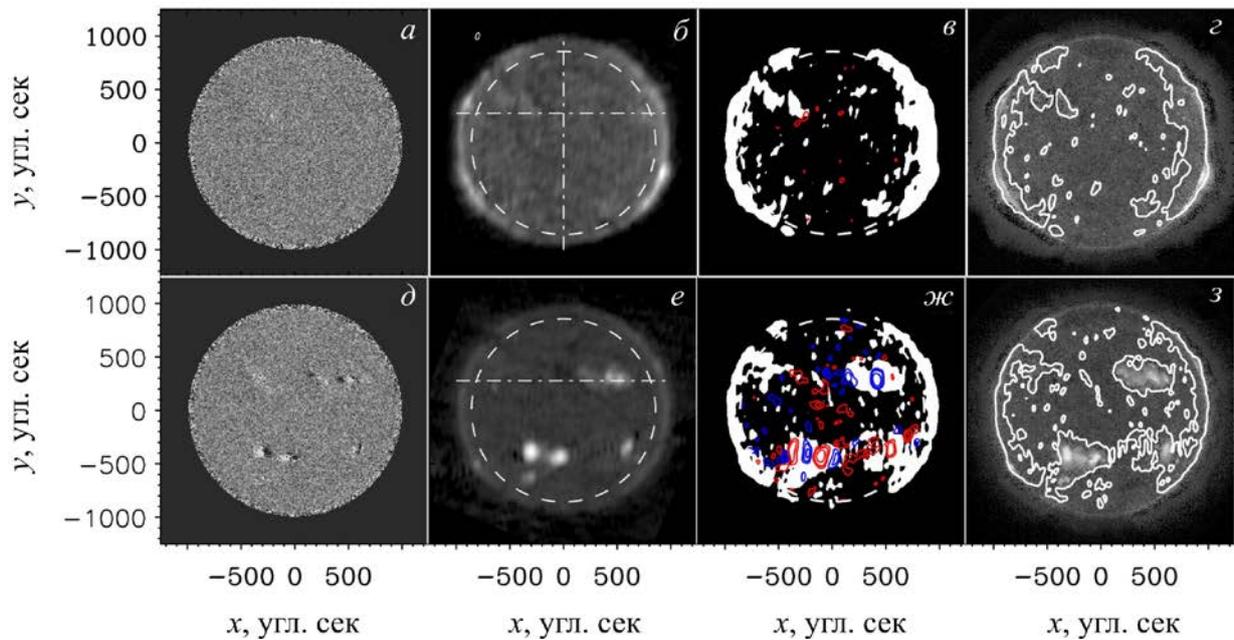


Рис. 1. Изображения диска Солнца 17 сентября 2021 г. (верхний ряд) и 8 сентября 2021 г. (нижний ряд): а, д — магнитограммы продольного магнитного поля; б, е — яркостные температуры СРГ на частоте 2.8 ГГц в интенсивности. Белая штриховая окружность ограничивает прилимовую область. Штрихпунктирные линии отмечают сечения, используемые для рис. 4. Диаграмма СРГ приведена в левом верхнем углу. Области с радиояркостью  $T_B > 35 \cdot 10^3$  К — белые маски. Красными/синими контурами показаны степени правой/левой поляризации на уровне 0.05 (в) и (-0.2, -0.1, -0.05, 0.05, 0.1, 0.2) (ж); сравнение модельных (фон) и измеряемых яркостных температур (контур) (z, з)

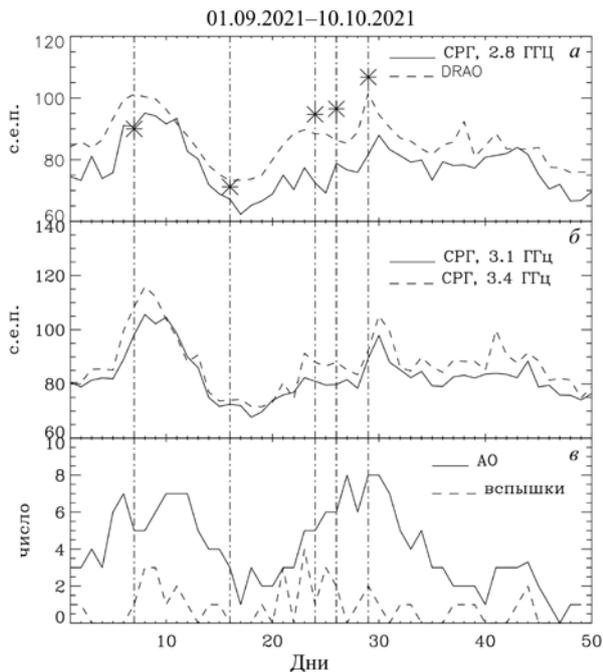


Рис. 2. Изменение интегральных микроволновых потоков Солнца в течение 50 дней: а — сравнение потоков  $F_{2.8}$  с  $F_{10.7}$ , звездочками показаны результаты расчета  $F_{10.7}$  по картам КУФ-излучения; б — потоки  $F_{3.1}$  и  $F_{3.4}$ ; в — количество активных областей и солнечных вспышек

Чтобы определить источники изменений интегрального потока Солнца, сравним радиокарты с малыми и большими потоками, полученные во время оборота CR 2248 в дни, отмеченные на рис. 2 вертикальными линиями. На карте 17 сентября 2021 г. выделяются по яркости прилимовые экваториальные области (рис. 1, в). Для численных оценок определим

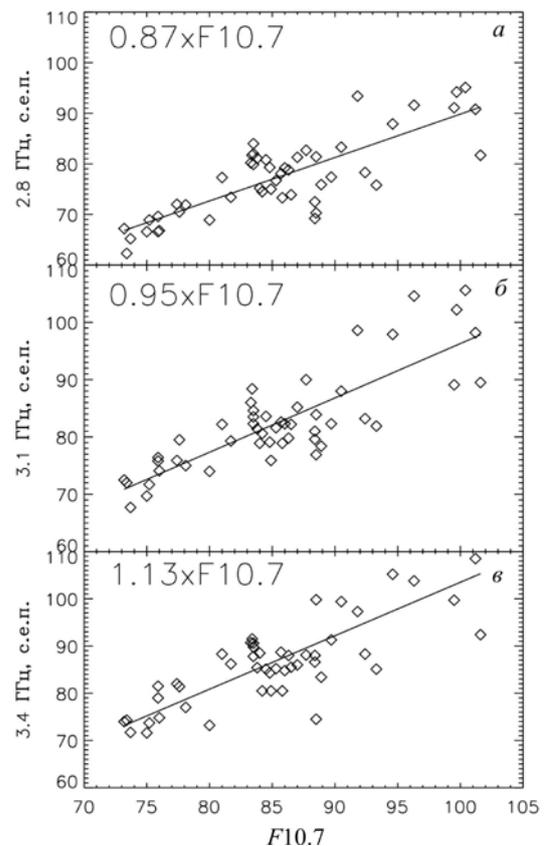


Рис. 3. Взаимосвязь измерений потока в DRAO ( $F_{10.7}$ ) и потоков СРГ на частотах 2.8, 3.1 и 3.4 ГГц. Сплошные линии — результаты линейной корреляции

здесь и далее радиус, ограничивающий прилимовую область, равным 855 угл. сек, что на 100 угл. сек меньше радиуса Солнца (белые штриховые окруж-

Относительный вклад источников излучения на 2.8 ГГц

Дата	$F_{2.8}$ , с.е.п.	$F$ , с.е.п. $T_{br} > 35 \cdot 10^3$ К	$F$ , с.е.п. лимб	$F$ , с.е.п. факел	$F$ , с.е.п. R-L/R+L>0.05	$F$ , с.е.п. DEM
08.09	95.1	39.5	4.2	19.2	16.1(40.1 %)	90.0
17.09	62.3	10.0	7.8	2.2	0	71.2
25.09	69.2	16.9	4.0	5.2	7.7(11.1 %)	94.7
27.09	76.7	21.5	7.1	7.8	6.6(8.6 %)	96.5
29.09	87.9	31.3	11.0	14.0	6.3(7.2 %)	106.8

ности). На рис. 1, *в* видно, что на диске находятся также три участка повышенной яркости, положение которых соответствует концентрациям магнитных пор и мелких пятен на магнитограмме (рис. 1, *а*), т. е. факельным площадкам.

Оценки вклада различных источников в интегральные потоки приведены в таблице для дней, указанных в первом столбце. Интегральные потоки, полученные интегрированием яркостных температур по всему диску, даны во втором столбце. В следующих четырех столбцах показаны приросты потоков в ярких источниках, рассчитанные по превышению яркостной температурой каждого пикселя над калибровочным значением  $27.1 \cdot 10^3$  К. Области с яркими источниками определялись с помощью критерия  $T_{br} > 35 \cdot 10^3$  К. В день с минимальным потоком прирост по всем ярким областям диска составляет 10 с.е.п., он складывается из прилимового уярчения с общим потоком 7.8 с.е.п. и дополнительного излучения факельных площадок 2.2 с.е.п. В последнем столбце таблицы приведен расчет интегрального потока Солнца по модели, выполненной с использованием данных КУФ-излучения.

Большое значение потока  $F_{2.8}$  наблюдалось 8 сентября 2021 г., когда на диске появились яркие окрестности пяти активных областей (рис. 1, *д*, *е*), над пятнами которых яркостная температура на порядок превышала ее значения в спокойных областях Солнца, а степени круговой поляризации излучения достигали значений выше 20 %. В активных областях южного полушария № 12866 и № 12868 максимальные яркостные температуры были равны  $2.6 \cdot 10^6$  К и  $1.9 \cdot 10^6$  К соответственно. Прирост излучения из областей с повышенной яркостной температурой был равен в этот день 39.5 с.е.п. В то же время площадь прилимовых уярчений в этот день была меньше и вклад их потока уменьшился до 4.2 с.е.п. Поток излучения из областей с поляризацией зависит от заданной степени поляризации. Если она выше 5 %, поток составляет около 16.1 с.е.п., что сравнимо по величине с приростом потока факельных площадок (19.2 с.е.п.). Таким образом, прирост излучения на частоте 2.8 ГГц при появлении активных областей обеспечивается как излучением из факельных площадок, расположенных в их окрестностях, так и гирорезонансным излучением из ярких поляризованных источников над пятнами магнитного поля.

Относительный вклад источников излучения 25, 27 и 29 сентября во время следующего оборота CR2249 показан в таблице. В эти дни на диске находилось от пяти до восьми активных областей, однако

потоки поляризованных источников оставались примерно постоянными. Вклад прилимовых уярчений варьировал от 4 до 11 с.е.п. Выделяется день 29 сентября, когда доминирует вклад тормозного излучения из лимбовых и факельных областей. Следует отметить, что при исключении из полного потока (второй столбец) значений прироста потока (третий столбец) остается примерно постоянная величина в пределах 52.3–56.7 с.е.п.

На модельных картах, рассчитанных по КУФ-излучению, выделяются области повышенной яркости в окрестности активных областей (факельные площадки), близкие к контурам распределения радиояркости, измеренным с помощью СРГ (рис. 1, *з*, *э*). Значения интегрального потока для пяти дней нанесены звездочками на рис. 2 и даны в последней колонке таблицы. Чтобы сравнить абсолютные значения измеренной и модельной яркостей, рассмотрим их вдоль сечений, показанных на рис. 1, *б*, *е* штрих-пунктирными линиями.

На рис. 4, *а–в* показаны распределения яркостной температуры в интенсивности на трех частотах и в поляризации на частоте 2.8 ГГц вдоль сечений диска. Пунктирной и штриховой линиями показаны уровни яркостной температуры  $2.7 \cdot 10^4$  К и  $3.5 \cdot 10^4$  К соответственно. Первая линия показывает температуру, используемую для калибровки методом гистограмм, вторая показывает уровень над флуктуациями радиояркости, используемый для выделения областей с повышенной яркостью, показанных на рис. 1. Подobie профилей яркостной температуры на трех частотах показывает, что уровень флуктуаций несолнечного происхождения не превышает  $10^3$  К. Отметим, что вклад прилимовых уярчений падает с ростом частоты приема.

На панелях *з*, *д* приведены сечения измеренных и модельных распределений яркостной температуры на частоте 2.8 ГГц. Модельный профиль сглажен с окном шириной 35 угл. сек, близкой к размеру диаграммы направленности СРГ на этой частоте. Сравнение профилей показывает, что превышение модельного потока на 14 % может быть связано с большим вкладом экваториальных прилимовых областей. Распределение яркостной температуры вдоль центрального меридиана (рис. 4, *б*, *д*) близко к плоскому и не показывает повышенного излучения в приполярной области.

В случае с активными областями сечение проходит через активные области № 12864 и № 12865, радиояркость которых достигает  $6 \cdot 10^5$  К (рис. 4, *в*, *е*). В активной области выделяется источник с поляризацией до 30 %, в котором можно заметить также изменение

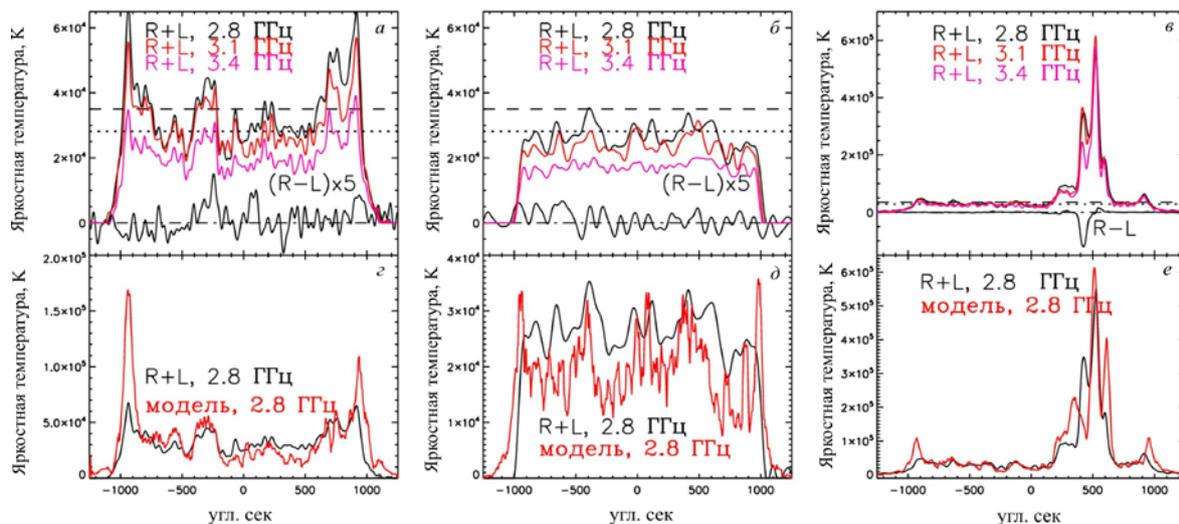


Рис. 4. Распределения яркостной температуры в интенсивности на трех частотах, поляризации R–L (панели а–в) и модельный профиль по данным КУФ-излучения (панели г–е) на частоте 2.8 ГГц вдоль сечений диска, показанных на рис. 1. По оси ординат — яркостные температуры в кельвинах. Панели а, г — 17 сентября, широтное сечение. Поток R–L увеличен в 5 раз. Панели б, д — 17 сентября, меридиональное сечение. Панели в, е — аналогичные зависимости для 8 сентября

соотношения температур в диапазоне 2.8–3.4 ГГц. В модельном профиле, рассчитанном по КУФ-данным, этому источнику соответствует провал в интенсивности. В то же время самые большие пики яркости модельного и измеренного профилей близки по месту и амплитуде.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение зависимостей от времени потоков солнечного излучения, полученных интегрированием двумерных распределений радиояркости, с потоками, измеренными с высокой точностью в канадской обсерватории DRAO, показывает их подобие. Коэффициент кросс-корреляции равен 0.87, а смещение около 18 ч согласуется с разницей во времени измерений в PAO и DRAO в Канаде. В то же время потоки, полученные СРГ на частоте 2.8 ГГц, систематически занижены относительно канадских данных на величину около 10 % (рис. 2, а).

Систематическая погрешность калибровки яркостных температур на изображениях СРГ может появиться по двум причинам. Первая связана с погрешностью определения инструментальной величины яркости спокойного Солнца по максимуму гистограммы попиксельных сигналов. Линейная зависимость потока, измеренного на СРГ на частоте 2.8 ГГц, от данных DRAO исключает влияние нелинейности измерений яркости. Профиль радиояркости вдоль сечения от полюса к полюсу без пересечения факельных площадок и лимбовых уярчений плоский, что позволяет полагать, что крупномасштабные искажения изображения, характерные для интерферометров, такие как наклоны поля, депрессии вблизи центра диска, не влияют значительно на положение максимума гистограммы (рис. 4 б, д). Более вероятной причиной систематического занижения яркостной температуры является отличие актуальной температуры участков спокойного Солнца вне активных областей от используемого

при калибровке значения, полученного в работах [Zirin et al., 1991; Borovik et al., 1992]. Это значение  $27.1 \cdot 10^3$  К было получено в обеих работах во время минимума солнечной активности между 20-м и 21-м циклами. Отметим, что даже в минимуме солнечной активности вклад оптически тонкого коронального излучения, которое может меняться в течение цикла и между ними, составляет около 15 с.е.п. [Schonfeld et al., 2015]. В нашем случае без активных областей вклад коронального излучения только в прилиम्бовых областях и факельных площадках составляет 10 с.е.п. Указания на изменчивость потока спокойного Солнца можно найти также в работе [Tapping, Valdes, 2011].

Наблюдения СРГ в интенсивности и поляризации позволяют выделять тормозную и гирорезонансную компоненты в интегральном солнечном излучении спокойного Солнца в реальном масштабе времени (см. таблицу). Основной вклад в оптически тонкую часть излучения дает тормозное излучение. С другой стороны, если рассматривать вклад различных механизмов в переменность интегрального потока, относительные вклады тормозного и гирорезонансного излучений могут быть сравнимы по величине. Вклад экваториальных лимбовых уярчений в переменность относительно небольшой и составляет ~5 с.е.п. Вариации потока связаны с активными областями на диске. Тормозное излучение генерируется в факельных площадках в окрестности активных областей. Гирорезонансное излучение с яркостью до нескольких МК генерируется в сильных магнитных полях над пятнами, однако их вклад относительно невелик из-за малых размеров источников.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестовые наблюдения на Сибирском радиогелиографе позволили впервые получить последовательность изображений солнечного диска в интенсивности и поляризации на нескольких частотах,

включая 2.8 ГГц. С помощью сравнения временных профилей полного потока, вычисленных по изображениям СРГ, с данными обсерватории DRAO апробирован метод калибровки радиояркости изображений по табличным данным, полученным в работе [Zirin et al., 1991; Borovik et al., 1992] во время минимума солнечной активности. При высокой степени кросс-корреляции обнаружено систематическое занижение потоков, измеряемых СРГ, что может быть признаком изменений яркостной температуры спокойного Солнца вне активных областей в цикле солнечной активности. Анализ изображений СРГ в интенсивности и поляризации показал, что основной вклад в излучение дает оптически толстое излучение хромосферы и тормозное излучение нижней короны. Переменность излучения определяется вариациями излучения факельных площадок в окрестности активных областей и гирорезонансным излучением из поляризованных источников над пятнами. Введение в эксплуатацию СРГ позволит проводить регулярный мониторинг прокси-индекса  $F10.7$  с выделением компоненты тормозного излучения в реальном масштабе времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-22-00019. Авторы благодарят команды обсерваторий PAO, SDO, DRAO за открытый доступ к данным. Экспериментальные данные получены с использованием уникальной научной установки ССРТ [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/73606/>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf62202003](https://doi.org/10.12737/szf62202003).
- Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 42, iss. 4. P. 599–609. DOI: [10.1016/j.asr.2007.07.048](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048).
- Borovik V.N., Kurbanov M.S., Makarov V.V. Distribution of radio brightness of the quiet sun in the 2-centimeter to 32-centimeter range. *Soviet Astronomy*. 1992. Vol. 36. P. 656.
- CASA Team, Bean B., Bhatnagar S., et al. CASA, the Common Astronomy Software Applications for radio astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2022. Vol. 134, iss. 1041. Id. 114501. 17 p. DOI: [10.1088/1538-3873/ac9642](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac9642).
- Christiansen W.N., Warburton J.A. The distribution of radio brightness over the solar disk at a wavelength of 21 centimetres. III. The quiet Sun two-dimensional observations. *Australian J. Phys.* 1955. Vol. 8. P. 474. DOI: [10.1071/PH550474](https://doi.org/10.1071/PH550474).
- Covington A.E. Solar radio emission at 10.7 cm, 1947–1968. *J. Royal Astron. Society of Canada*. 1969. Vol. 63. P. 125.
- Dudok de Wit T., Bruinsma S., Shibasaki K. Synoptic radio observations as proxies for upper atmosphere modelling. *J. Space Weather and Space Climate*. 2014. Vol. 4. Id. A106. 13 p. DOI: [10.1051/swsc/2014003](https://doi.org/10.1051/swsc/2014003).
- Felli M., Lang K.R., Willson R.F. VLA observations of solar active regions. I. The slowly varying component. *Astrophys. J.* 1981. Vol. 247. P. 325–347. DOI: [10.1086/159041](https://doi.org/10.1086/159041).
- Fleishman G.D., Kuznetsov A.A., Landi E. Gyroresonance and free-free radio emissions from multithermal multicomponent plasma. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 914, iss. 1. Id. 52. 16 p. DOI: [10.3847/1538-4357/abf92c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf92c).
- Gary D., Yu S., Chen B., LaVilla V. A new view of the solar atmosphere: daily full-disk multifrequency radio images from EOVSA. *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 2020. Vol. 235. P. 385.0.
- Jacchia L.G. Revised Static Models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles. *SAO Special Rep.* 1971. Vol. 332.
- Krueger A. Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics. 1979. 330 p.
- Kundu M.R. Solar Radio Astronomy. 1965.
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The multifrequency Siberian Radioheliograph. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280, iss. 2. P. 651–661. DOI: [10.1007/s11207-012-0008-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0008-7).
- Saint-Hilaire P., Hurford G.J., Keating G., et al. Allen Telescope Array multi-frequency observations of the Sun. *Solar Phys.* 2012. Vol. 277, iss. 2. P. 431–445. DOI: [10.1007/s11207-011-9906-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9906-3).
- Schmahl E.J., Kundu M.R. Microwave proxies for sunspot blocking and total irradiance. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, no. A10. P. 19851–19864. DOI: [10.1029/95JA00677](https://doi.org/10.1029/95JA00677).
- Schmahl E.J., Kundu M.R. Synoptic Radio Observations. *Synoptic Solar Physics*. 1998. Vol. 140. P. 387.
- Schonfeld S.J., White S.M., Henney C.J., et al. Coronal sources of the solar  $F10.7$  radio flux. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 808, iss. 1. Id. 29. 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/29](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/29).
- Schonfeld S.J., White S.M., Hock-Mysliwiec R.A., McAteer R.T.J. The slowly varying corona. I. Daily differential emission measure distributions derived from EVE spectra. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 844, iss. 2. Article id. 163. 16 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7b35](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7b35).
- Su Y., Veronig A.M., Hannah I.G., et al. Determination of differential emission measure from solar extreme ultraviolet images. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 856, iss. 1. Article id. L17. 10 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aab436](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aab436).
- Swarup G., Kakinuma T., Covington A.E., et al. High-resolution studies of ten solar active regions at wavelengths of 3–21 cm. *Astrophys. J.* 1963. Vol. 137. P. 1251. DOI: [10.1086/147601](https://doi.org/10.1086/147601).
- Tapping K.F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelengths: the temporal variability of the 10.7-cm flux. *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 829–838. DOI: [10.1029/JD092iD01p00829](https://doi.org/10.1029/JD092iD01p00829).
- Tapping K.F., DeTracey B. The origin of the 10.7-cm flux. *Solar Phys.* 1990. Vol. 127, iss. 2. P. 321–332. DOI: [10.1007/BF00152171](https://doi.org/10.1007/BF00152171).
- Tapping K.F., Valdés J.J. Did the Sun change its behaviour during the decline of cycle 23 and into cycle 24? *Solar Phys.* 2011. Vol. 272, iss. 2. Article id. 337. DOI: [10.1007/s11207-011-9827-1](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9827-1).
- Tapping K.F., Cameron H.T., Willis A.G. S-component sources at 21 cm wavelength in the rising phase of cycle 23. *Solar Phys.* 2003. Vol. 215, iss. 2. P. 357–383. DOI: [10.1023/A:1025645908639](https://doi.org/10.1023/A:1025645908639).
- Tobiska W.K., Bouwer S.D., Bowman B.R. The development of new solar indices for use in thermospheric density modeling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, iss. 5. P. 803–819. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.11.001).
- Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun. *Astrophys. J.* 1991. Vol. 370. P. 779. DOI: [10.1086/169861](https://doi.org/10.1086/169861).
- URL: <http://ovsa.njit.edu/SynopticImg/eovsamedia/eovs-browser> (дата обращения 25 февраля 2023 г.).
- URL: <https://github.com/kuznetsov-radio/GRFF/tree/master/Binaries> (дата обращения 25 февраля 2023 г.).
- URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily> (дата обращения 25 февраля 2023 г.).
- URL: <https://www.solarmonitor.org> (дата обращения 25 февраля 2023 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/73606/> (дата обращения 25 февраля 2023 г.).

Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Алтынцев А.Т., Глоба М.В., Мешалкина Н.С. Спокойная корона Солнца: ежедневные изображения на длинах волн 8.8–10.7 см. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 71–77. DOI: [10.12737/szf-92202308](https://doi.org/10.12737/szf-92202308).