

---

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ПОТОКА НА ЧАСТОТАХ 161 И 245 МГц

### CORRELATION ANALYSIS OF SOLAR FLUX ABSOLUTE MEASUREMENTS AT 161 AND 245 MHz

---

**А.Г. Сетов**

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

**Д.С. Кушнарев**

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

**A.G. Setov**

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

**D.S. Kushnarev**

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

---

**Аннотация.** Излучение Солнца в метровом диапазоне длин волн происходит из верхних слоев солнечной короны. В статье представлены абсолютные измерения солнечного потока, проводимые на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (частота 161 МГц) и в обсерватории Learmonth (частота 245 МГц). Проведен корреляционный анализ данных с целью выявления взаимосвязей между солнечными потоками на разных частотах. Фоновое излучение спокойного Солнца оказалось в ожидаемых рамках. Рассмотрено поведение фоновой и медленно меняющейся компонент излучения в солнечном цикле. Сопоставление коэффициента корреляции Пирсона и рангового коэффициента корреляции Спирмана показало нелинейный характер зависимости между потоком в метровом диапазоне и индексом  $F10.7$ . Корреляция между измерениями солнечного потока на частотах 161 и 245 МГц оказалась ниже, чем корреляции с индексом  $F10.7$ . Анализ внутрисуточной корреляции и автокорреляции показал наличие суточного хода, вносящего погрешность в измерения.

**Ключевые слова:** излучение Солнца, абсолютные измерения, Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), обсерватория Learmonth, метровый диапазон, фоновое излучение, медленно меняющаяся компонента.

**Abstract.** Solar emission in meter waves originates from upper layers of the solar corona. We present absolute measurements of solar flux from Irkutsk Incoherent Scatter Radar (161 MHz frequency) and Learmonth Observatory (245 MHz frequency). We perform correlation analysis to investigate the relation between solar flux values at different frequencies. Background emission of the quiet Sun is within the expected limits. We examine the behavior of background and slowly-varying emission components during a solar cycle. By comparing the Pearson correlation coefficient with the Spearman rank correlation coefficient, we have found that the dependence of the meter flux on the  $F10.7$  index is non-linear. The correlation between solar flux measurements at 161 and 245 MHz appeared to be lower than that with the  $F10.7$  index. Analysis of daily correlation and autocorrelation shows a diurnal variation that introduces an error into the measurements.

**Keywords:** solar emission, absolute measurements, Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR), Learmonth Observatory, meter waves, background emission, slowly-varying component.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечное излучение охватывает весь радиочастотный спектр, причем механизм его возникновения и влияние на систему Солнце—Земля значительно меняется с частотой. В настоящее время создано множество инструментов для наблюдения за излучением Солнца, однако реже исследуется излучение в метровом диапазоне длин волн [Borkowski, 1982; Lantos, 1998; Iwai et al., 2012]. В этом диапазоне источник излучения находится в солнечной короне. Доминирующий механизм излучения зависит от солнечной активности: для спокойного Солнца — это тепловое тормозное излучение, во время радиовсплесков (резких повышений интенсивности излучения) — нетепловое излучение на собственной частоте плазмы, ее гармониках либо гармониках гиро-

частоты. В недавнее время появились новые крупные калиброванные радиотелескопы диапазона до 300 МГц — LOFAR (LOw Frequency Array) [Vocks et al., 2018] и MWA (Murchison Widefield Array) [Oberoi et al., 2017], которые, однако, исследуют Солнце только в рамках отдельных экспериментов. Тем не менее, инструментальное покрытие метрового диапазона оставляет желать лучшего. Кроме того, для полноценного исследования процесса излучения и спектрального распределения, а также для сравнения между собой данных разных инструментов необходимо, чтобы проводимые измерения солнечного излучения были абсолютными, т. е. получена конкретная физическая величина на калиброванном инструменте [Tapping, 2013; Lu et al., 2015; Tan et al., 2015].

Общей оценкой уровня солнечного излучения служит спектральная плотность мощности потока излучения, коротко называемая полным потоком. Эта величина измеряется в единицах с.е.п. (солнечная единица потока). В рамках данной статьи мы проведем корреляционный анализ для изучения взаимосвязи между солнечными потоками на разных частотах метрового диапазона в солнечном цикле, а также проведем сравнение с индексом  $F10.7$ . Будут представлены измерения солнечного потока, проводимые на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) на частоте 161 МГц и в обсерватории Learmonth на частоте 245 МГц. Выбор обусловлен географическим положением: ИРНР находится в 120 км от Иркутска (долгота  $103^\circ$  E), Learmonth — в Австралии (долгота  $114^\circ$  E), поэтому Солнце наблюдается примерно в одно время. Данные ИРНР охватывают период 2011–2022 гг., Learmonth — 2006–2022 гг.

ИРНР, работающий в диапазоне частот 154–163 МГц, с 90-х гг. применяется для решения различных научных задач [Medvedev, Potekhin, 2019], включающих исследования ионосферы, детектирование и отслеживание космических объектов, радиоастрономические наблюдения. ИРНР использовался также в ряде специальных экспериментов: наблюдение когерентного эха от вытянутых вдоль поля неоднородностей в ионосфере; исследование ионосферных неоднородностей, возникающих во время работы двигателей космических кораблей «Прогресс», и радиозондирование Луны. Расположение радара уникально, поскольку это единственный подобный научный инструмент в Восточно-Сибирском регионе. В весенний-летний период на радаре проводятся наблюдения Солнца и измерение потока солнечного излучения на частоте 161 МГц ( $\lambda=1.86$  м). Эти данные представляют интерес, так как в мире мало радиотелескопов, позволяющих проводить абсолютные измерения в метровом диапазоне длин волн с высокой чувствительностью. Ранее была проведена калибровка приемного тракта радара и разработан метод измерения солнечного потока для нескольких режимов наблюдений [Сетов и др., 2020]. Здесь мы рассмотрим статистические особенности полученных данных о солнечном потоке в сравнении с данными обсерватории Learmonth.

Обсерватория Learmonth является частью сети Radio Solar Telescope Network (RSTN), проводящей регулярные абсолютные измерения солнечного потока на восьми дискретных частотах. Данные RSTN часто используются при изучении поведения солнечного излучения в широком диапазоне частот [Kashapova et al., 2021], а также для калибровки других научных инструментов [Hamini et al., 2021] и телекоммуникационных систем [Giersch, Kennewell, 2022]. В [Giersch, Kennewell, 2022] проводится корреляционный анализ данных между разными станциями RSTN и описываются ошибки измерения на разных частотах.

Мы подробно опишем методы обработки данных ИРНР, рассмотрим поведение и статистические характеристики среднегодовых, среднесуточных и внутрисуточных значений солнечного потока на 161 и 245 МГц. Кроме того, мы сравним рас-

пределение значений солнечного потока во время спокойного Солнца с ожидаемыми модельными значениями. В конце статьи мы рассмотрим автокорреляцию измерений для соседних дней и источник погрешностей измерений — необъясненный суточный ход.

## 1. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ИРНР обладает рупорной антенной размером  $246 \times 12$  м и высотой  $\sim 20$  м [Potekhin et al., 2009; Medvedev, Potekhin, 2019]. Ширина основного лепестка антенны составляет  $0.5^\circ \times 10^\circ$ . В рупоре расположен поляризационный фильтр, состоящий из металлических полос и пропускающий только одну (горизонтальную) поляризацию. Длинная сторона антенны ориентирована в направлении север—юг. В основании антенны — щелевая структура, в начале и конце которой установлены возбуждающие рупоры. Направление луча диаграммы направленности определяется частотой возбуждающей волны. Изменение частоты от 154 до 163 МГц приводит к отклонению луча на  $30^\circ$  в южном направлении. Эта особенность ограничивает ширину полосы сигналов, принимаемых с определенного направления. Для измерения солнечного потока используется полоса 200 кГц, поэтому эффективная ширина диаграммы направленности составляет  $1.25^\circ \times 10^\circ$ .

Солнце попадает в сектор обзора ИРНР в весенне-осенний период и в основном лепестке наблюдается в период с 1 мая по 15 августа. По мере прохождения Солнца через сектор обзора частота, на которой сигнал максимален, меняется от 159 до 163 МГц, но мы будем относить полученный солнечный поток к частоте 161 МГц — средней частоте наблюдения Солнца в максимуме диаграммы направленности. Измерения проводятся в радиоастрономическом режиме, когда передающая система радара полностью отключена. Большая часть измерений приходится на промежуток 03:30–07:30 UT (10:30–14:30 LT).

Методика оценки солнечного потока по данным ИРНР включает фильтрацию и усреднение принятого сигнала, калибровку приемного тракта и диаграммы направленности и непосредственно вычисление полного солнечного потока. В этой статье рассматривается фоновая и медленно меняющаяся компоненты излучения Солнца, а кратковременные радиовсплески длительностью до 1 мин будут отфильтрованы. Фоновая компонента соответствует излучению спокойного Солнца, когда на диске нет солнечных пятен. Медленно меняющаяся компонента — это длительные повышения уровня солнечного излучения при появлении активных областей на Солнце. Для фильтрации кратковременных радиовсплесков и электромагнитных помех используется пороговая фильтрация по медианному абсолютному отклонению, которое более устойчиво к интенсивным выбросам по сравнению со среднеквадратичным отклонением. После фильтрации и усреднения разрешение по времени составляет 1 с.

Для калибровки приемного тракта ИРНР уже длительное время [Сетов и др., 2018, 2020] приме-

няются карты шума неба, получаемые для конкретной частоты по модели диффузного галактического радиоизлучения [Zheng et al., 2016]. Калибровка проводится почастотно: сигнал на каждой отдельной частоте сопоставляется с модельным сигналом для определения АЧХ и собственных шумов системы антенна — приемный тракт. В результате калибровки определяется мощность принятого сигнала в ваттах.

Новшеством данной работы является дополнительная корректировка диаграммы направленности, проведенная по архиву данных наблюдения Солнца. По результатам сопоставления формы сигналов (треков) за один и то же день и месяц, но за разные годы оказалось, что истинная форма диаграммы направленности на частотах выше 159 МГц существенно отличается от модельной и значительно меняется с частотой. Чтобы скорректировать диаграмму, для каждой комбинации дня и месяца был выбран опорный трек Солнца, соответствующий спокойному Солнцу, и проведена его нормировка. Впоследствии диаграмма направленности корректировалась в соответствии с опорным треком для конкретного дня наблюдения. Дополнительно проводилась корректировка температурной зависимости. Ввиду того, что антенна обладает значительными размерами и подвержена температурному расширению и сжатию, сильные перепады температуры резко-континентального климата Восточной Сибири приводят к изменению коэффициентов уравнения сканирования. Максимум сигнала от радиоисточников смещается по частоте. Чтобы скомпенсировать смещение, на этапе обработки проводится вписывание в спектр принятого сигнала гауссианы. Дополнительные корректировки к диаграмме направленности позволили увеличить длительность ежедневных измерений и увеличить общее число дней измерения потока по сравнению с ранними работами.

Мощность принятого сигнала  $P_r$  имеет вид

$$P_r = \frac{\lambda^2}{8\pi} \int \int_{\Omega} I(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi, f) G(f) df d\Omega, \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность излучения радиоисточника;  $F$  — диаграмма направленности;  $G$  — коэффициент усиления;  $B$  — ширина полосы приемника;  $\Omega$  — телесный угол;  $\lambda$  — длина волны.

Для вычисления солнечного потока делается допущение о малости угловых размеров Солнца по сравнению с эффективной шириной диаграммы направленности для сигнала с полосой  $B=200$  кГц. Тогда (1) можно упростить:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{8\pi} G_0(\theta_0, \varphi_0) S_{\text{sun}}, \quad (2)$$

где  $G_0$  — коэффициент усиления по направлению  $(\theta_0, \varphi_0)$ ;  $S_{\text{sun}}$  — искомый солнечный поток (интеграл интенсивности по солнечному диску).

В (2) принятый поток удваивается, чтобы учесть влияние линейного поляризационного фильтра в антенне. Данный подход часто используется при вы-

числении солнечного потока в метровом диапазоне длин волн, поскольку фоновое излучение Солнца в нем не поляризовано, а во время радиовсплесков излучение обладает круговой поляризацией, что для антенны с линейной поляризацией приводит к такому же уменьшению принятой мощности вдвое.

Оценка случайной погрешности измерений проводится по методу распространения ошибок. Предполагается, что квадратурные компоненты принятого сигнала обладают гауссовым распределением. Было определено, что для 92 % измерений потока относительное стандартное отклонение составляет менее 10 %, для 98 % измерений — менее 20 %. Систематическая погрешность измерений включает суточный ход в рядах данных (детальнее рассматривается ниже), ошибки калибровки и ошибки из-за допущений, принятых при вычислении солнечного потока. Сложно точно оценить влияние систематической погрешности, но на основе сравнительного анализа по данным за разные годы мы предполагаем, что ошибка составляет 5–25 %.

RSTN состоит из четырех станций, разнесенных таким образом, чтобы обеспечить непрерывное наблюдение Солнца. Станции имеют стандартный набор антенн для регистрации солнечного излучения на восьми дискретных частотах, охватывающих диапазон 245–15400 МГц [Giersch, Kennewell, 2022]. Солнечная обсерватория Learmonth, расположенная в Австралии, обладает разнообразными инструментами для исследования Солнца, включая антенны RSTN. В данной работе нас интересуют данные Learmonth по измерению солнечного потока на частоте 245 МГц, доступные на [<https://www.sws.bom.gov.au/Solar/3/4>]. На этой частоте используется логопериодическая антенна размером 8.5 м и шириной луча 10°. Абсолютные измерения проводятся в основном с 22:00 до 10:00 UT и имеют временное разрешение 1 с. При обработке данных мы отфильтровали значения потока меньше 2 с.е.п. и выше 10000 с.е.п.

В корреляционном анализе используется коэффициент корреляции Пирсона  $R$  как мера линейной зависимости двух случайных величин и коэффициент ранговой корреляции Спирмана  $S$  [Spearman, 1904], который показывает, насколько хорошо связь двух случайных величин может быть описана с помощью монотонной функции. При определении коэффициента Спирмана исходные ряды данных заменяются на ранги — порядковые номера измерений в отсортированных по возрастанию выборках. Далее вычисляется корреляция Пирсона между наборами рангов по упрощенной формуле

$$s = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (R_i(X) - R_i(Y))^2, \quad (3)$$

где  $R_i(X)$ ,  $R_i(Y)$  — ранги  $i$ -го измерения в выборках  $X$  и  $Y$ ,  $n$  — размер выборок. Мы используем коэффициент Спирмана как более общую метрику корреляции между двумя величинами, не ограниченную только линейной зависимостью.

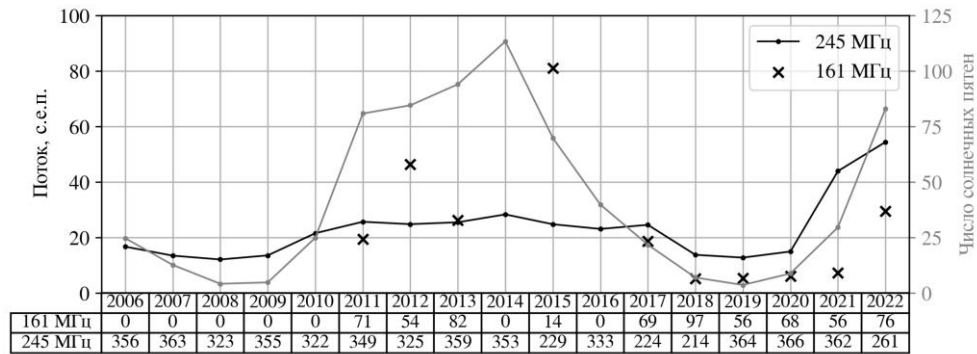


Рис. 1. Среднегодовой поток солнечного излучения и среднегодовое число солнечных пятен. Черная линия — поток на частоте 245 МГц; черные крестики — поток на частоте 161 МГц; серая линия — число солнечных пятен. Ось абсцисс — общее число дней наблюдения Солнца на соответствующей частоте

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ В СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОТОКОВ

На рис. 1 показан среднегодовой поток солнечного излучения на частотах 161 и 245 МГц в 2006–2022 гг. в сравнении с числом солнечных пятен. Таблица в нижней части графика показывает число дней в году, в которые проводились измерения потока. Для данных ИРНР общее число дней составляет 643 дня, для данных Learmonth — 5458 дня. Измерения на ИРНР проводятся только в весенне-летнее время и перемежаются с активными ионосферными и спутниковыми наблюдениями, в то время как инструменты Learmonth предназначены для круглосуточного мониторинга солнечной активности. В 2014–2016 гг. измерения на ИРНР практически не проводились. На рисунке видно, что поток в метровом диапазоне возрастает с ростом солнечной активности. Кажется, что новый цикл будет более активным в метровом диапазоне, потому что поток на частоте 245 МГц в 2021–2022 гг. уже превысил значения прошлого цикла (2008–2019 гг.), так же как и поток на 161 МГц в 2022 г. превысил поток 2011 г.

Поток на частоте 161 МГц превысил поток на частоте 245 МГц в 2012, 2013 и 2015 г., хотя в теории ожидается, что поток должен возрастать с частотой, по крайней мере, для спокойного Солнца [Benz, 2009]. Для 2015 г. разница обусловлена малой выборкой данных — в краткий 14-дневный период с 19.06.2015 по 02.07.2015 наблюдалась мощная радиобуря (длительное, порой многодневное, повышение потока). В 2011–2013 гг. ИРНР работал в старом режиме, который не позволял эффективно фильтровать помехи и мог внести погрешность в измерения. С другой стороны, в годы высокой солнечной активности среднегодовой поток на 161 МГц мог быть выше из-за того, что радиобури были более интенсивными на этой частоте. Чтобы оценить различие между 161 и 245 МГц, были построены гистограммы распределения среднесуточного потока (рис. 2). Из распределения за все время наблюдений

видно разнообразие значений солнечного потока, варьирующего от единиц до сотен с.е.п. Мода распределения на 161 МГц ожидаемо ниже моды на 245 МГц, однако поток измерений на ИРНР обладает большим числом экстремальных значений (выше 200 с.е.п.)

Среднегодовой поток (см. рис. 1) представляет собой сумму фонового излучения и медленно меняющейся компоненты излучения. Отдельно фоновое излучение Солнца можно измерить, когда на солнечном диске нет пятен. На двух панелях справа (см. рис. 2) показаны гистограммы распределения потока спокойного Солнца. Были отобраны дни, когда число солнечных пятен равно нулю в день наблюдения, за день до и в день после дня наблюдения. Для данных ИРНР это 124 дня (19 % всех данных), для Learmonth — 1416 дней (22 % всех данных). Измерения сравниваются с модельным потоком спокойного Солнца (вертикальные линии) по [Benz, 2009], где приведена формула, аппроксимирующая поток в минимуме солнечной активности. Модельные значения составляют 4.8 с.е.п. для частоты 161 МГц и 11.1 с.е.п. для частоты 245 МГц [Hamini et al., 2021] модифицировали формулу [Benz, 2009] на основе данных станции San Vito RSTN для аппроксимации потока во время максимума солнечной активности (8.1 с.е.п. для 161 МГц и 18.8 с.е.п. для 245 МГц). Однако спокойные дни чаще наблюдаются в минимуме солнечного цикла, и для максимума выборка нерепрезентативна. Таким образом, потоки спокойного Солнца ИРНР и Learmonth близок к ожидаемым значениям во время минимума солнечной активности (среднее, медиана и мода распределений показаны на рис. 2).

## 3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ ПОТОКОВ

Мы провели корреляционный анализ по данным среднесуточного потока. Усреднение проводилось по всем данным за каждые сутки. Длительность измерений солнечного потока для каждого выбранного дня составляет не менее 1 ч, при этом средняя длительность измерений Learmonth ~10 ч, ИРНР — ~3 ч.

При вычислении корреляции обычно проводится отсеивание выбросов, вносящих сильное смещение

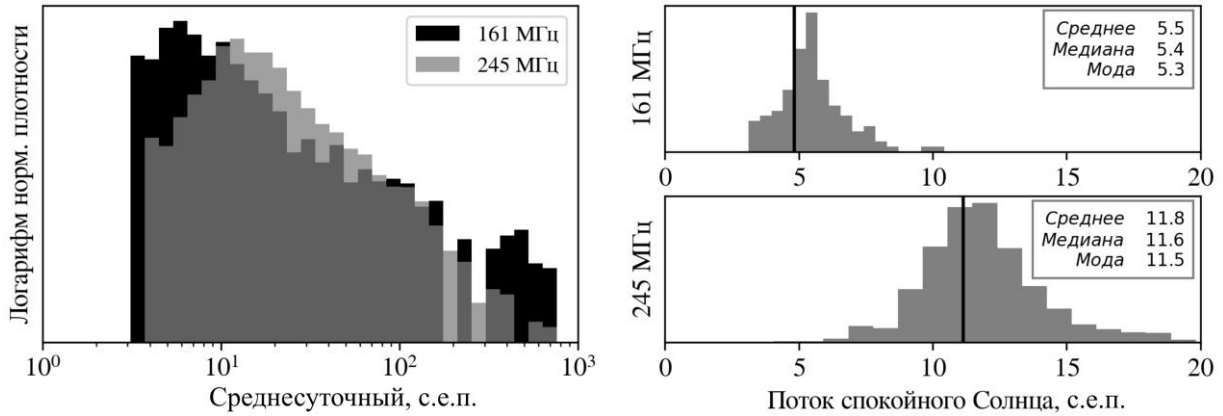


Рис. 2. Гистограммы распределения среднесуточного потока солнечного излучения за все время наблюдений в логарифмическом масштабе (слева); для спокойного Солнца (справа). Черной вертикальной линией отмечено модельное значение потока спокойного Солнца по [Benz, 2009]

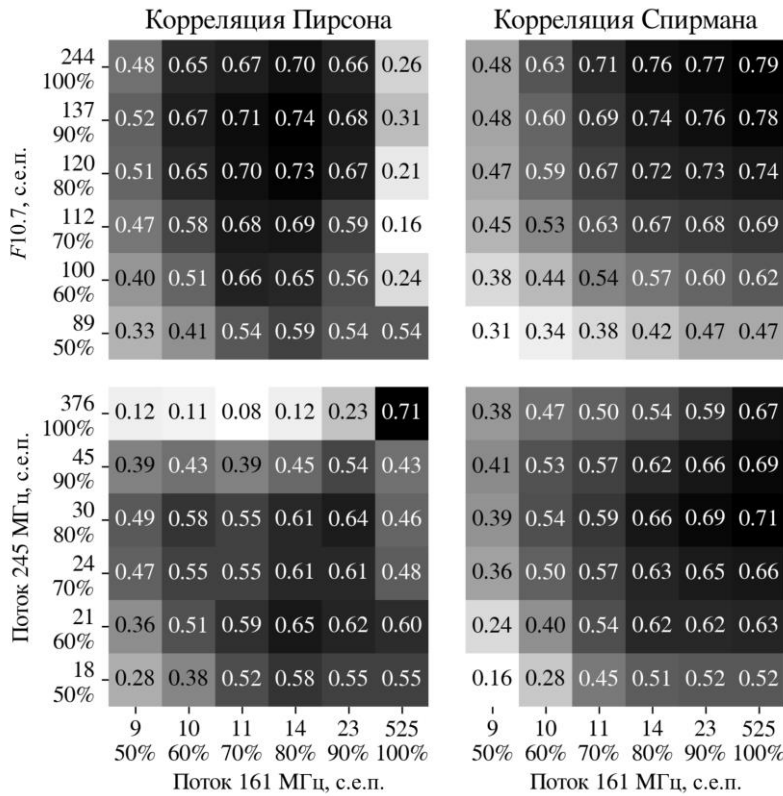


Рис. 3. Матрицы корреляции среднесуточного потока при разных перцентилях выборок данных. Верхний ряд — корреляция между потоком 161 МГц и F10.7. Нижний ряд — корреляция между потоками 161 и 245 МГц. Слева — корреляция Пирсона, справа — корреляция Спирмана

в оценку. Как было показано выше, солнечный поток метрового диапазона варьирует на два порядка, поэтому интересно изучить зависимость корреляции от порога отсечки выбросов. На рис. 3 показаны матрицы корреляций Пирсона и Спирмана между потоком 161 МГц, индексом F10.7 (частота 2800 МГц) [Tapping et al., 2013] и потоком 245 МГц. В каждой ячейке матрицы вычислен соответствующий коэффициент Пирсона или Спирмана на основе части выборки, где значения потока равны или ниже определенного порога (процентиля).

В сравнении потока 161 МГц и F10.7 (верхние панели) видно, что корреляция Пирсона наибольшая  $R=0.7\div 0.74$  для значений потока 161 МГц ниже

14 с.е.п. (80 % данных). В то же время корреляция Спирмана максимальна  $S=0.79$  при использовании всех доступных данных, что свидетельствует о нелинейном характере зависимости между потоками. Матрица корреляции 245 МГц и F10.7 (на рисунке не приведена), обладает идентичным распределением с максимумом корреляции Пирсона  $R=0.67$  для значений потока 245 МГц ниже 24.7 с.е.п. (80 %) и с резким падением корреляции Пирсона до  $R=0.25$  при использовании всех данных при высоком значении коэффициента Спирмана  $S=0.71$ . Резкое снижение корреляции Пирсона до  $R=0.2\div 0.4$  для 100 % перцентиля при небольшом изменении корреляции Спирмана говорит о том, что значительное повыше-

ние потоков 161 и 245 МГц не сопровождается значимым изменением потока  $F_{10.7}$ . Похожее сравнение потоков 161 и 245 МГц с числом солнечных пятен показало, что корреляция и Пирсона, и Спирмана ниже на  $\sim 0.1$ , чем корреляция с  $F_{10.7}$ .

Сравнение потоков 161 и 245 МГц между собой (нижние панели) показало две особенности. Во-первых, максимум корреляции Пирсона достигается при использовании всех данных. Прежде всего, это обусловлено шумовыми бурями, которые наблюдаются одновременно на обеих частотах и имеют потоки выше 100 с.е.п. Вторая особенность связана с тем, что максимальные значения коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмана ( $R=0.71$ ,  $S=0.71$ ) неожиданно меньше, чем в матрице корреляции с  $F_{10.7}$ , несмотря на близость частот метрового диапазона. Оценка корреляции может иметь ошибку, так как суточные измерения Learmonth имеют большую длительность, поэтому недолговременные повышения потока 161 МГц могут привести к смещению оценки среднесуточного потока, в то время как усреднение измерений 245 МГц сильнее сглаживает одинокие пики.

#### 4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРИСУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ

Благодаря близкому долготному расположению и секундному временному разрешению можно напрямую сравнивать измерения потока на двух частотах, полученные в течение дня. На рис. 4 показана гистограмма распределения корреляции Пирсона между внутрисуточными вариациями потоков 161 и 245 МГц. Распределение имеет гауссообразную форму с небольшим смещением в область положительных корреляций. Среднее значение коэффициента корреляции составляет 0.04. Было проверено, что характер распределения не зависит от года и одинаков для спокойного/активного Солнца. На рис. 5 показаны примеры измерений потоков на двух частотах с положительной корреляцией. В случае спокойного Солнца поток меняется незначительно и корреляция невысокая. В случае шумовой бури, несмотря на различие интенсивностей излучения, характер изменения потоков на разных частотах одинаковый и корреляция составляет  $R=0.97$ . Было установлено, что, за исключением двух дней с особенно интенсивными шумовыми бурями (одна из них — буря на рис. 5), внутрисуточная корреляция не зависит от среднесуточного значения потока. Анализ отдельных дней с высокой антикорреляцией показал, что в данных Learmonth и ИРНР может присутствовать суточный ход, вносящий погрешность в измерения. Чтобы рассмотреть эту потенциальную проблему, был проведен автокорреляционный анализ.

#### 5. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРИСУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ ДЛЯ СОСЕДНИХ ДНЕЙ

В идеальном случае не ожидается какого-либо суточного хода и корреляции между измерениями сол-

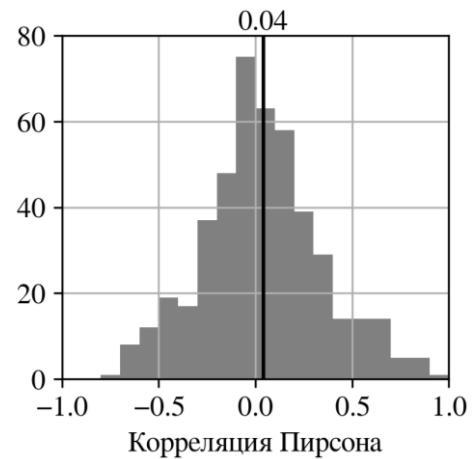


Рис. 4. Гистограмма распределения корреляции Пирсона между внутрисуточными вариациями потока на частотах 161 и 245 МГц. Вертикальной черной линией показано среднее значение коэффициента корреляции

нечного потока, проводимыми в соседние дни. Мы вычислили корреляцию Пирсона между рядами измерений каждой пары последовательных дней наблюдения (автокорреляция с задержкой в один день). На рис. 6 слева показаны гистограммы распределения корреляции для потоков 161 и 245 МГц. Формы распределения для разных частот существенно различаются, но смещение в область положительных корреляций наблюдается в обоих случаях ( $R_{\text{сред}}=0.27$  для 161 МГц,  $R_{\text{сред}}=0.44$  для 245 МГц). В качестве примеров высокой корреляции  $R>0.8$  справа показаны сравнения рядов измерений потоков соседних дней на соответствующей частоте. В обоих случаях виден явный повторяющийся суточный ход в данных. Исходя из формы распределения корреляции и метода измерения потока на ИРНР, можно сделать вывод, что в части рядов данных на 161 МГц есть суточный ход, связанный с погрешностью определения диаграммы направленности. Для потока 245 МГц мы предполагаем, что форма распределения корреляции состоит из двух мод: моды около нуля для измерений, не коррелирующих ото дня ко дню, и моды с высокой корреляцией вблизи  $p=1$  для дней с значительным суточным ходом. Это предположение подтверждается визуальным анализом разных рядов измерений Learmonth: большинство данных с высокой автокорреляцией имеют ярко выраженный суточный ход (см. рис. 6, ряд для 245 МГц).

На рис. 7 показано усредненное по месяцам и годам значение автокорреляции. Месячные вариации незначительны и близки к общему среднему значению для соответствующих частот. Годовые вариации более интересны. Для потока 161 МГц наибольшая средняя корреляция отмечается в 2015 г. (всего 14 дней наблюдения), а наименьшая — в 2017 г., однако со временем корреляция меняется мало. Средняя корреляция для данных Learmonth высока в 2006–2010 гг. ( $R_{\text{сред}}\approx 0.5$ ), спадает до  $R_{\text{сред}}=0.15$  в 2011 г. и потом растет вплоть до максимального значения  $R_{\text{сред}}\approx 0.7$  в 2021 и 2022 г.

Простая пороговая фильтрация данных ИРНР и Learmonth с высокой автокорреляцией  $R>0.8$  позволила повысить значения коэффициента корреляции

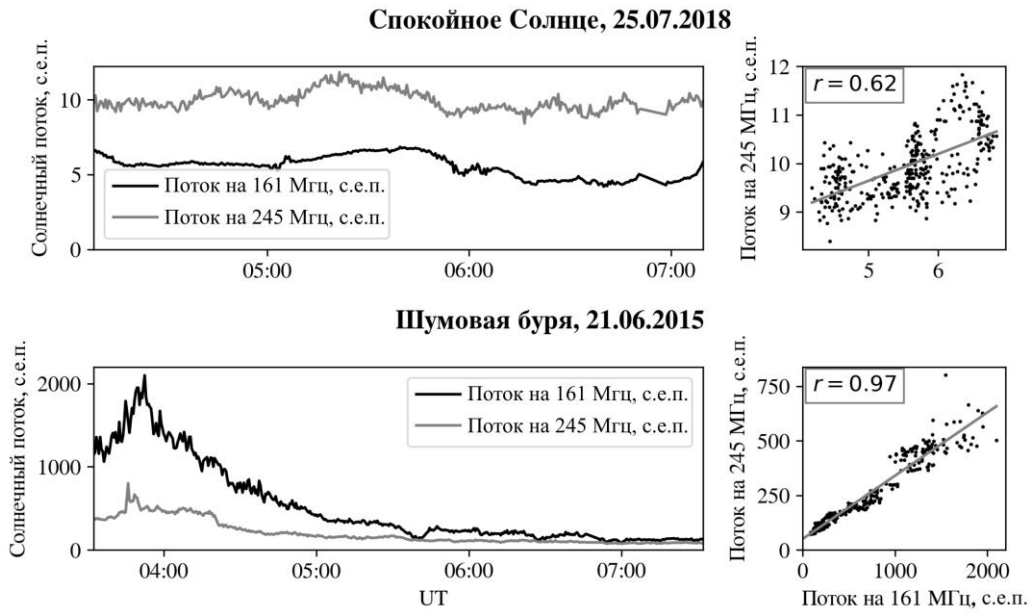


Рис. 5. Сравнение внутрисуточных вариаций потоков 161 и 245 МГц при спокойном Солнце и во время шумовой бури

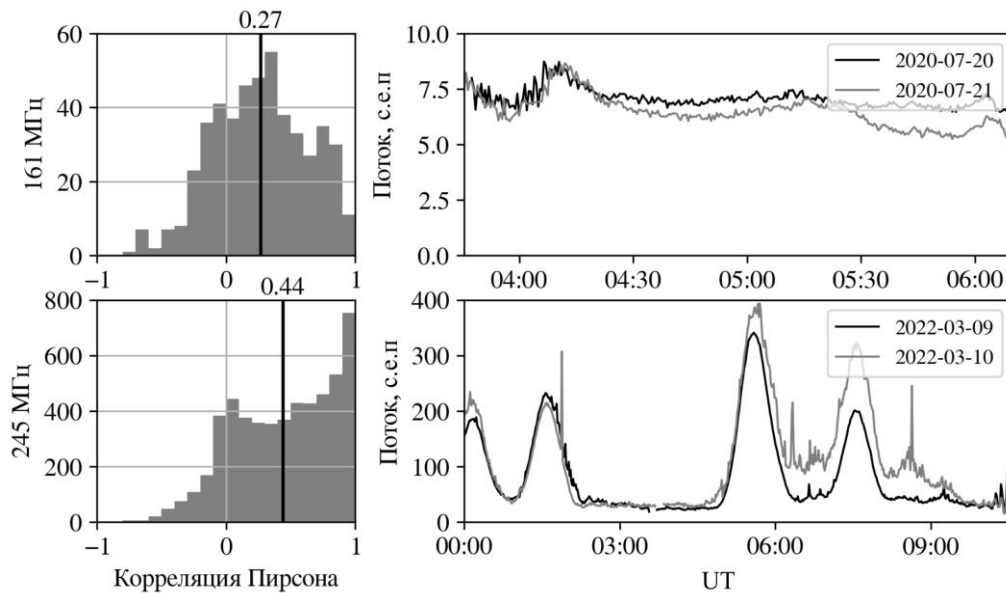


Рис. 6. Распределение автокорреляции для соседних дней (слева). Вертикальной линией отмечено среднее значение. Внутрисуточные вариации потоков соседних дней при высоком значении коэффициента корреляции (справа). Верхние панели — для 161 МГц, нижние — для 245 МГц

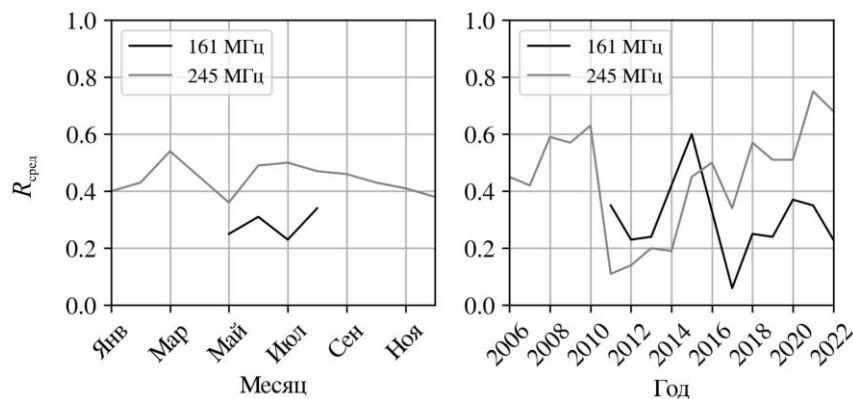


Рис. 7. Усредненное по месяцам (слева) и годам (справа) значение коэффициента корреляции  $R$  дневного потока соседних дней

среднесуточных потоков, представленных в разделе 3, на  $\sim 0.05$ . Тем не менее, соотношения между коэффициентами корреляции для разных комбинаций частот (см. корреляционные матрицы на рис. 3) изменились незначительно.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Новые дополнительные методы корректировки диаграммы направленности ИРНР расширили количество доступных измерений солнечного потока 161 МГц по сравнению с предыдущими работами [Сетов и др., 2020]. Несмотря на разреженные со значительными пропусками данные ИРНР, они предоставляют информацию о редко исследуемой части спектра излучения Солнца. Однако автокорреляционный анализ показал наличие погрешности из-за необъясненного суточного хода, относящегося к влиянию диаграммы направленности. Тем не менее, в предыдущих работах погрешность была выше, так как использовалась модель диаграммы направленности, не отображающая значительные частотные вариации в диапазоне наблюдения Солнца. В дальнейшем планируется уменьшить погрешность измерений путем совершенствования моделей антенны и диаграммы направленности ИРНР, а также путем увеличения объема измерений за счет наблюдений в последующие годы.

Фоновый поток излучения Солнца 161 и 245 МГц, полученный на ИРНР и в Learmonth, принимает значения, близкие к модельным в минимуме солнечной активности. Это прежде всего является индикатором достоверности калибровки данных ИРНР и Learmonth. Среднегодовой поток следует за изменениями числа солнечных пятен в течение солнечного цикла. Присутствует положительная, хотя и небольшая корреляция среднесуточного потока с индексом  $F10.7$  (меняется в диапазоне  $0.26\text{--}0.79$  в зависимости от выбора метода расчета корреляции). Корреляция Спирмана между потоком на частотах метрового диапазона и индексом  $F10.7$  выше, чем корреляция Пирсона, что говорит о нелинейном характере зависимости. Исследование корреляции разных процентилей данных показало, что значительное повышение потоков 161 и 245 МГц не сопровождается значимыми изменениями потока  $F10.7$ . В среднем корреляция 161 МГц и  $F10.7$  выше на  $\sim 0.08$ , чем корреляция 245 МГц и  $F10.7$ . Поскольку для этого нет физического обоснования, мы считаем, что эта разница относится к качеству измерений. Корреляция с числом солнечных пятен ниже, чем корреляция с  $F10.7$ . Возможно, это связано с тем, что число солнечных пятен принимает постоянное нулевое значение при спокойном Солнце, в то время как  $F10.7$  может меняться.

Вопреки ожиданиям корреляция 161 и 245 МГц в среднем ниже, чем корреляция 161 МГц и  $F10.7$ , а также 245 МГц и  $F10.7$ , несмотря на близость частот метрового диапазона. Некоторые ряды дневных измерений во время шумовых бурь показывают явную высокую корреляцию, благодаря чему корреляция Пирсона принимает максимальное значение  $R=0.71$  при использовании всех доступных данных.

Однако, если отбросить эти редкие бури, корреляция падает до значений  $0.4\text{--}0.6$ . Калибровка принятой мощности ИРНР и Learmonth — это линейное преобразование, поэтому она не должна менять коэффициент корреляции. При отсутствии какого-либо физического обоснования мы относим это несоответствие к погрешностям измерений. Стоит отметить, что данные Learmonth также показали сравнительно малые значения коэффициента корреляции ( $0.6\text{--}0.8$ ) с данными других станций RSTN [Giersch, Kennewell, 2022].

Распределение корреляции внутрисуточных вариаций потоков 161 и 245 МГц незначительно смещено в положительную сторону. Некоторые дни показывают высокую корреляцию, особенно во время длительных радиобурь, но в большей части ряды данных не коррелируют. Автокорреляционный анализ показал наличие суточного хода в данных, что может частично служить причиной появления отрицательной корреляции дневных рядов. Мы считаем, что суточный ход в данных ИРНР появляется из-за ошибок корректировки диаграммы направленности. Для данных Learmonth, однако, природа суточного хода неясна. Кажется, что значительная часть дней, особенно в последние годы, содержит интенсивные медленные вариации, форма которых повторяется каждый день. Авторы данной работы не встречали упоминания суточного хода в других статьях, где используются данные Learmonth. При дальнейшей работе с измерениями потоков как ИРНР, так и Learmonth, требуется разработать методики, которые позволят показать наличие или отсутствие суточного хода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели сравнительный корреляционный анализ измерений солнечного потока, проводимых на ИРНР в радиоастрономическом режиме на 161 МГц и в обсерватории Learmonth RSTN на 245 МГц. Данные ИРНР охватывают 2011–2022 гг. и благодаря корректировке диаграммы направленности включают как минимум 56 дней наблюдений каждый год с 2017 по 2022 г. длительностью от 1 ч. Абсолютные измерения полного потока солнечного излучения в метровом диапазоне дополняют спектральные измерения многочисленных, но малочувствительных спектрополяриметров. В статье было рассмотрено изменение потока в течение солнечного цикла и отдельно оценено распределение фонового потока спокойного Солнца. Показано, что потоки спокойного Солнца 161 и 245 МГц согласуются с модельными расчетами. Анализ показал наличие корреляции между потоком в метровом диапазоне и индексом  $F10.7$ , однако корреляция между 161 и 245 МГц оказалась ниже, чем при сравнении с индексом  $F10.7$ . Возможными причинами являются ошибка оценки корреляции из-за разницы в объеме данных Learmonth и ИРНР, а также наличие суточного хода в части данных Learmonth.

Обнаружена корреляция внутрисуточных вариаций потоков для соседних дней. Наличие корреляции интерпретируется как результат погрешности



измерений. В случае ИРНР эта погрешность, возможно, связана с ошибкой оценки диаграммы направленности радара. В будущих работах планируется разработка методики корректировки суточного хода и уменьшения погрешности, а также проведение анализа шумовых бурь на 161 МГц с высоким временным разрешением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00146, [<https://rscf.ru/project/22-17-00146/>] в части разработки метода обработки данных и анализа полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в части проведения наблюдений. В работе использовались данные измерений Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [<http://ckp-rf.ru/usu/77733/>]. Данные о солнечном потоке, измеренном в обсерватории Learmonth, доступны на ftp-сервере Бюро метеорологии правительства Австралии [<ftp://ftp-out.sws.bom.gov.au>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сетов А.Г., Глоба М.В., Медведев А.В., и др. Первые результаты абсолютных измерений потока солнечного излучения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР). *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 33–38. DOI: [10.12737/szf-43201804](https://doi.org/10.12737/szf-43201804).
- Сетов А.Г., Кушнарев Д.С., Васильев Р.В., Медведев А.В. Длительные наблюдения солнечного потока в 2011–2019 гг. на Иркутском радаре некогерентного рассеяния. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 33–39. DOI: [10.12737/szf-63202004](https://doi.org/10.12737/szf-63202004).
- Benz A.O. Radio emission of the quiet Sun. *Landolt-Börnstein*. 2009. Vol. VI/4B. P. 1–13. DOI: [10.1007/978-3-540-88055-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88055-4_5).
- Borkowski K.M. The quiet Sun brightness temperature at 127 MHz. *Solar Phys.* 1982. Vol. 81. P. 207–215. DOI: [10.1007/BF00151297](https://doi.org/10.1007/BF00151297).
- Giersch O., Kennewell J. Analysis of the radio solar telescope network's noon flux observations over three solar cycles (1988–2020). *Radio Sci.* 2022. Vol. 57. e2022RS007456. DOI: [10.1029/2022RS007456](https://doi.org/10.1029/2022RS007456).
- Hamini A., Auxepaules G., Birée L., et al. ORFEES — a radio spectrograph for the study of solar radio bursts and space weather applications. *J. Space Weather Space Clim.* 2021. Vol. 11, no. 57. DOI: [10.1051/swsc/2021039](https://doi.org/10.1051/swsc/2021039).
- Iwai K., Tsuchiya F., Morioka A., Misawa H. IPRT/AMATERAS: A new metric spectrum observation system for solar radio bursts. *Solar Phys.* 2012. Vol. 277. P. 447–457. DOI: [10.1007/s11207-011-9919-y](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9919-y).
- Kashapova L.K., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., et al. Common origin of quasi-periodic pulsations in microwave and decimetric solar radio bursts. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, no. 185. P. 1–16. DOI: [10.1007/s11207-021-01934-x](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01934-x).
- Lantos P. Low frequency observations of the quiet Sun: a review. *Proc. Nobeyama Symposium “Solar Physics with Radio Observations”*. 1998. P. 11–24.
- Lu L., Liu S., Song Q., Ning Z. Calibration of Solar Radio Spectrometer of the Purple Mountain Observatory. *Chinese Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 39. P. 497–511. DOI: [10.1016/j.chinastron.2015.10.007](https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2015.10.007).
- Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future. *History of Geo- and Space Sciences*. 2019. Vol. 10. P. 215–224. DOI: [10.5194/hgss-10-215-2019](https://doi.org/10.5194/hgss-10-215-2019).
- Oberoi D., Sharma R., Rogers A.E.E. Estimating solar flux density at low radio frequencies using a sky brightness model. *Solar Phys.* 2017. Vol. 292, 75. P. 1–16. DOI: [10.1007/s11207-017-1096-1](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1096-1).
- Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. Vol. 49, no. 7. P. 1011–1021. DOI: [10.1134/S0016793209070299](https://doi.org/10.1134/S0016793209070299).
- Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The Americal J. Psychology*. 1904. Vol. 15, no. 1. P. 72–101. DOI: [10.2307/1412159](https://doi.org/10.2307/1412159).
- Tan C., Yan Y., Tan B., et al. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-Sun radio emission. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 808:61. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/61).
- Tapping K.F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). *Space Weather*. 2013. Vol. 11. P. 394–406. DOI: [10.1002/swe.20064](https://doi.org/10.1002/swe.20064).
- Vocks C., Mann G., Breiting F., et al. LOFAR observations of the quiet solar corona. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 614, no. A54. P. 1–9. DOI: [10.1051/0004-6361/201630067](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630067).
- Zheng H., Tegmark M., Dillon J.S., et al. An improved model of diffuse galactic radio emission from 10 MHz to 5 THz. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* 2016. Vol. 464, no. 3. P. 3486–3497. DOI: [10.1093/mnras/stw2525](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2525).
- URL: <https://www.sws.bom.gov.au/Solar/3/4> (дата обращения 2 июня 2023 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/22-17-00146/> (дата обращения 29 сентября 2023 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/usu/77733/> (дата обращения 29 сентября 2023 г.).
- URL: <ftp://ftp-out.sws.bom.gov.au> (дата обращения 2 июня 2023 г.).

### Как цитировать эту статью:

Сетов А.Г., Кушнарев Д.С. Корреляционный анализ абсолютных измерений солнечного потока на частотах 161 и 245 МГц. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 54–62. DOI: [10.12737/szf-94202306](https://doi.org/10.12737/szf-94202306).