

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.9, 520.27

А. И. БРАЖЕНКО¹, А. А. КОВАЛЬ², А. А. КОНОВАЛЕНКО²,
А. А. СТАНИСЛАВСКИЙ², Э. П. АБРАНИН², В. В. ДОРОВСКИЙ²,
В. Н. МЕЛЬНИК², Р. В. ВАЩИШИН¹,
А. В. ФРАНЦУЗЕНКО¹, О. В. БОРЫСЮК¹

¹Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина
E-mail: brazhai@gmail.com

²Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: koval2211@rambler.ru

ОСОБЕННОСТИ КONTИНУАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ КОРОНЫ СОЛНЦА В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Представлены результаты исследований радиоизлучения спокойного Солнца в декаметровом диапазоне длин волн. Наблюдения выполнены с помощью антенной решетки УРАН-2 в летние сезоны 2008–2009 гг. на частотах 20 и 25 МГц в полосе 250 кГц и на радиотелескопе УТР-2 в летне-осенний период 2010 г. в полосе частот 16.5 ÷ 33.0 МГц в режиме одномерного гелиографа. Усредненные значения плотности потока излучения спокойного Солнца по данным измерений на УРАН-2 равны 860 Ян на 25 МГц и 710 Ян на 20 МГц. Величины интегральной плотности потока излучения по измерениям на радиотелескопе УТР-2 для этих частот составили 950 и 800 Ян соответственно. Спектральный индекс в диапазоне частот 16.5 ÷ 200 МГц по наблюдениям на инструментах УТР-2 и УРАН-2 оказался одинаковым и равным -2.1 ± 0.1 . Определены угловые значения экваториального диаметра солнечной короны по результатам наблюдений на УТР-2. Они хорошо согласуются со значениями, известными для континуального излучения Солнца на более высоких частотах. Показана эффективность скоординированного (или одновременного) применения различных территориально разнесенных радиотелескопов, имеющих совпадающий диапазон частот.

Ключевые слова: спокойное Солнце, верхняя корона, плотность потока радиоизлучения, спектральный индекс, одномерный гелиограф

1. Введение

Наблюдения солнечной атмосферы в радиодиапазоне проводятся в широкой полосе частот: от граничной частоты пропускания ионосферы около 10 МГц ($\lambda = 30$ м) до 300 ГГц (субмиллиметровой области спектра, $\lambda < 1$ мм). Разные длины волн излучения соответствуют разным слоям солнечной атмосферы: миллиметровые – нижней хромосфере, сантиметровые – средней и верхней хромосфере, дециметровые – переходной области, метровые – ниж-

ней короне и декаметровый диапазон – верхней короне. Многочастотные наблюдения позволяют определять электронную плотность, температуру и магнитные поля в солнечной короне в зависимости от высоты над поверхностью Солнца. Радиосолнце в периоды минимума активности выглядит как большой (> 30 угловых минут) относительно однородный источник с размерами, превышающими солнечный радиус, обычно вытянутый в экваториальном направлении благодаря тому, что солнечная атмосфера имеет на экваторе большую электронную плотность, чем на полюсах. Это позволяет проводить его диагностику с помощью исследований солнечного радиоконтинуума. Источником радиоизлучения

© А. И. Браженко, А. А. Коваль, А. А. Коноваленко,
А. А. Станиславский, Э. П. Абрагин, В. В. Доровский,
В. Н. Мельник, Р. В. Ващишин, А. В. Французенко,
О. В. Борысюк, 2012

Солнца в отсутствие солнечных вспышек является некогерентное излучение тепловой плазмы в короне. За пределами активных областей плазменная частота значительно больше, чем гирочастота, поэтому радиояркость Солнца обусловлена в целом тепловым рассеянием вследствие электрон-ионных столкновений в короне.

Наиболее благоприятные условия для наблюдения континуального радиоизлучения Солнца создаются в периоды минимума солнечной активности. В декаметровом диапазоне длин волн это излучение значительно слабее, чем солнечные радиовсплески (нетепловой механизм излучения), и для их одновременного наблюдения требуется высокая чувствительность и большой динамический диапазон радиотелескопов. При этом эффекты солнечной активности могут влиять на характеристики солнечной атмосферы и ее уже трудно считать невозмущенной.

В настоящее время радиоизображение Солнца исследуется регулярно на ряде радиоастрономических инструментов. Некоторые из них предназначены только для солнечных исследований: радиогелиограф в Нансе (Франция) [1, 2], работающий в диапазоне 150 ÷ 450 МГц, антенная решетка Оуэнс Вэлли (США), на которой ведутся наблюдения в диапазоне 1 ÷ 18 ГГц и радиогелиограф Нобеяма (Япония), на котором осуществляются измерения на частотах 17 и 34 ГГц. Российский радиотелескоп РАТАН-600 проводит солнечные наблюдения в диапазоне 1 ÷ 20 ГГц, а Сибирский солнечный радиотелескоп на частоте 5.7 ГГц. Яростное распределение теплового континуума в последние десятилетия было исследовано очень подробно на миллиметровых и сантиметровых длинах волн с высоким разрешением. Успехи в наблюдениях на метровых и декаметровых волнах пока весьма скромные, что вызвано рядом причин. Во-первых, это отсутствие радиотелескопов с такими же высокими характеристиками по чувствительности и пространственному разрешению, какие имеются на более высоких частотах. Кроме того, большая интенсивность земных помех различной природы, негативное влияние ионосферы (рефракция, поглощение, рассеяние радиоволн), высокая температура галактического фона существенно затрудняют прецизионные исследования астрофизических объектов, включая Солнце. (В дневное время многие из перечисленных факторов усугубляются.) Весьма эффективные космические мис-

сии для солнечных исследований (WIND, STEREO и др.) успешно регистрируют спорадическое солнечное радиоизлучение на предельно низких частотах (0.1 ÷ 16 МГц), но они не способны регистрировать континуальное солнечное радиоизлучение в силу ограниченной чувствительности (используются элементарные антенны).

В декаметровом диапазоне наиболее эффективными наземными инструментами на сегодняшний день являются радиотелескоп УТР-2 (Украина) [3], работающий на частотах 8 ÷ 33 МГц, и радиотелескоп Гаурибиданур (Индия), на котором ведутся измерения на частотах 30 ÷ 110 МГц. Ожидается ввод в строй новых радиотелескопов больших площадей, например, LOFAR, LWA, GURT, LSS, но их строительство еще продолжается. К сожалению, выведены из эксплуатации радиотелескопы Калгурра (Австралия) и антенная решетка Кларк Лейк (США) [4–7]. Иногда для солнечных наблюдений в диапазоне 0.3 ÷ 22 ГГц используется телескоп VLA (США) и в диапазоне 10 ÷ 70 МГц – антенна NDA (Нансе, Франция), которая позволяет наблюдать только спектральные характеристики всплесковой активности Солнца. При этом следует отметить, что указанные инструменты имеют разные характеристики, наблюдения проводятся в разное время (в силу различного географического положения), что представляет заметные трудности при сопоставлении полученных результатов. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что скоординированное и/или одновременное применение разнесенных низкочастотных радиотелескопов (с учетом зоны видимости), имеющих совпадающие диапазоны частот, существенно повышает надежность и эффективность исследований в условиях негативного влияния помех и ионосферы.

Исследования континуального излучения спокойного Солнца на низких частотах наряду с наблюдениями в высокочастотной области спектра являются основными источниками определения структуры, распределения электронной концентрации, высоты излучающего слоя, температуры и формы короны. Данные об излучении спокойного Солнца в декаметровом диапазоне представляют особый интерес, поскольку дают возможность находить параметры внешней короны Солнца на расстоянии двух – трех радиусов от его центра. Примерно в этой области атмосферы Солнца происходит зарождение солнечного ветра, полного понимания природы которого пока еще нет.

С целью изучения континуального радиоизлучения Солнца были проведены наблюдения с помощью радиотелескопа УРАН-2 в летние сезоны 2008–2009 гг., а также антенной системы УТР-2 в летне-осенний период 2010 г. Этим наблюдениям посвящена настоящая статья, которая организована следующим образом. В разделе 2 описаны характерные особенности используемых инструментов в контексте исследований радиоизлучения спокойного Солнца. Результаты наблюдений представлены в разделе 3. В Заключение подводятся итоги рассмотренных в настоящей работе исследований.

2. Инструменты

2.1. Радиотелескоп УТР-2

Радиотелескоп УТР-2 Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины (Харьков) является крупнейшим современным декаметровым радиоастрономическим инструментом с наибольшей в мире геометрической площадью антенной системы, около 138000 м^2 , (его координаты: $49^{\circ}39'$ с. ш., $36^{\circ}56'$ в. д.) [8]. Его антенная система имеет Т-образную форму и включает в себя две прямоугольные решетки (так называемые плечи “Север–Юг” и “Запад–Восток”). Они построены из широкополосных горизонтальных вибраторов, общее число которых равно 2040. Большее плечо “Север–Юг” вытянуто вдоль меридиана и состоит из 1440 вибраторов, а его геометрические размеры составляют $1860 \times 53 \text{ м}$. Плечо “Запад–Восток” с размерами $900 \times 39.3 \text{ м}$ вытянуто вдоль параллели и имеет в своем составе 600 элементов. Все вибраторы ориентированы в направлении запад–восток, поэтому УТР-2 может регистрировать принимаемый сигнал только как линейно поляризованное радиоизлучение. Изменение положения диаграммы направленности радиотелескопа осуществляется фазированием сигналов дискретными кабельными линиями временных задержек, управляемыми с помощью персонального компьютера. Фазирование сигналов выполнено по многоэтажной (елочной) схеме и проводится в UV -плоскости. Сигналы в антенне “Запад–Восток” фазированы одним этажом фазирования по координате V и тремя этажами по координате U , а в решетке “Север–Юг” – одним этажом по U и четырьмя этажами по V . Конструктивно схема фазирования и суммирования реализо-

вана таким образом, что перед последним этажом фазирования плечо “Север–Юг” включает в себя восемь секций, а плечо “Запад–Восток” – четыре секции. Секции не имеют общих элементов и являются структурно независимыми блоками. Для компенсации потерь в антеннах и кабельных линиях коммуникаций применяется четырехъярусная трехполосная система антенного усиления сигналов [9]. Существует возможность сканирования радиоисточников пятью “карандашными” лучами диаграммы направленности, равнонаправленными по склонению. Пятилучевой режим диаграммы направленности радиотелескопа реализуется из сигналов восьми секций антенны “Север–Юг” с помощью гибридных разветвителей, в которых они разделяются на пять каналов, после чего происходит временная задержка и суммирование сигналов каждого канала восьми секций. В результате формируются пять “ножевых” лучей диаграммы направленности антенны “Север–Юг”. Для получения “карандашных” лучей сигналы каждого из пяти “ножевых” лучей перемножаются аналоговым или цифровым методом (в последнем случае с помощью двухвходового кросс-корреляционного цифрового приемника) с сигналами на выходе антенны “Запад–Восток”. Угловые размеры каждого луча на частоте 25 МГц равны $25' \times 25'$ по склонению и прямому восхождению.

Наблюдения с помощью радиотелескопа УТР-2 проводятся в непрерывной полосе частот от 8 до 33 МГц. В зависимости от помеховой обстановки ее можно изменять. В качестве приемно-регистрирующего устройства применяется многоканальный (8192 канала) цифровой спектроанализатор нового поколения DSPZ с шириной частотного канала около 4 кГц [10]. Динамический диапазон такого цифрового приемника более 90 дБ, что позволяет одновременно регистрировать как относительно слабые сигналы (например, континуальное излучение спокойного Солнца), так и мощные события (разнообразные солнечные всплески). Этот двухвходовый цифровой приемник осуществляет быстрый фурье-анализ принятого сигнала в реальном времени с получением двух автоспектров и кросс-корреляционного комплексного спектра.

2.2. Радиотелескоп УРАН-2

Антенная решетка УРАН-2 также была разработана в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины и входит в гло-

бальную всеукраинскую радиоинтерферометрическую сеть УРАН [11]. Она находится на расстоянии в 153 км от антенной системы УТР-2 вблизи села Степановка Полтавской области (ее координаты: $49^{\circ}38'$ с. ш., $34^{\circ}49'$ в. д.).

Антенна радиотелескопа состоит из 512 турникетных излучателей с геометрическими размерами 238×118 м. Такая конфигурация излучателей дает возможность одновременно регистрировать две линейно поляризованные составляющие сигнала радиоизлучения. Все элементы излучателей расположены под углом $\pm 45^{\circ}$ к меридиану и образуют 16 рядов, ориентированных вдоль параллели, по 32 излучателя в каждом ряду. Управление диаграммой направленности этой антенны осуществляется тем же способом, что и на радиотелескопе УТР-2, т. е. применяется метод временного фазирования сигналов с использованием дискретных линий временной задержки по двум угловым координатам: $l = \cos \epsilon \sin A$ и $m = \cos \epsilon \cos A$ (ϵ – угол места, A – азимут). Для фазирования и суммирования сигналов используется многоэтажная схема. Она состоит из трех этажей фазирования как по координате m , так и по координате l . Структура антенного усиления инструмента УРАН-2 в отличие от УТР-2 имеет меньшее число ярусов – два, и является двухполосной с целью обеспечения максимально возможной линейности характеристик усилителей в рабочей полосе частот от 9 до 33 МГц. Перед регистрацией сигналов в антенной системе используется два подхода. В первом из них применяется гибридное устройство, на выходе которого формируется сумма и разность сигналов восточной и западной половин антенной решетки УРАН-2. Этот режим использовался при наблюдениях, выполненных в летний период 2008 г. Во втором случае применяется корреляционный режим, т. е. перемножение сигналов восточной и западной половин антенны УРАН-2. Такой режим был реализован в наблюдательной кампании 2009 г. Угловая ширина луча диаграммы направленности антенны составляет примерно $3.5^{\circ} \times 7^{\circ}$ на частоте 25 МГц.

Приемное устройство УРАН-2 состоит из двух двухканальных супергетеродинных приемников (чтобы проводить измерения на двух отдельных частотах, например 20 и 25 МГц, в двух ортогональных поляризациях) с одним преобразованием частоты, промежуточной частотой 10.7 МГц

и полосой приема $200 \div 300$ кГц. Принятый сигнал подается на 10-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), содержащий 4 идентичных канала преобразования сигнала. Далее интерфейсный блок (стандартный интерфейс IDE) позволяет проводить непрерывный ввод в компьютер тех данных, которые поступают от АЦП, с потоком до 4 МБ/с. Программное обеспечение этого комплекса регистрации сигналов выполняет ряд полезных функций: устранение неравномерности частотной характеристики приемника, сужение полосы принятого сигнала до 250 кГц, фильтрация узкополосных помех и др.

3. Наблюдения и результаты

3.1. Наблюдения континуального радиоизлучения Солнца на УРАН-2

Исследования континуального радиоизлучения Солнца проводились на радиотелескопе УРАН-2 в летние месяцы 2008 и 2009 гг. Измерения выполнялись одновременно на двух частотах: 20 и 25 МГц. Активные области на диске Солнца в это время наблюдений отсутствовали.

Полученные в эксперименте на УРАН-2 данные были представлены в единицах, пропорциональных антенной температуре T_A или видимой плотности потока

$$S_A = \frac{2kT_A}{\lambda^2},$$

где k – постоянная Больцмана, а λ – длина волны, на которой осуществлялись наблюдения. Полная видимая плотность потока определяется по формуле

$$S = \int_{\Omega_C} S_A d\Omega,$$

где Ω_C – телесный угол источника радиоизлучения.

В декаметровом диапазоне изменения наблюдаемой полной плотности потока радиоизлучения Солнца связаны не только с вариациями активности Солнца, но и с величиной затухания радиоволн в ионосфере, а также с рефракцией их на ионосферных неоднородностях. Средние величины ослабления плотности потока обычно учитываются при наблюдении мощного эталонного космического источника, положение на небесной

сфере и время наблюдения которого должны быть как можно ближе к положению и времени наблюдения измеряемого объекта. В качестве такого источника был выбран хорошо известный радиостанция Телец А (ЗС144). Полученные значения плотности потока излучения этого источника составили примерно 2870 Ян на частоте 25 МГц и 3430 Ян на частоте 20 МГц, что хорошо согласуется с данными обзоров, полученных на УТР-2 и Винером [12].

С помощью УРАН-2 были получены длительные ряды ежедневных значений плотности потока радиоизлучения спокойного Солнца, фрагмент наблюдений которых представлен на рис. 1. Здесь видны части двух 10-минутных сканов. Заметно различие значений плотности потока непрерывного радиоизлучения Солнца в максимуме сканов. Мы полагаем, что временные вариации плотности потока радиоизлучения зависят скорее не столько от изменений излучения спокойного Солнца, сколько от дискретности и асинхронности фазирования решетки УРАН-2. Этот эффект существенно уменьшается при усреднении ряда сканов. При обработке результатов рассматривались только те сканы спокойного Солнца, которые не были искажены кратковременными всплесками с длительностью, сравнимой с длиной скана, и с интенсивностями равными и большими уровня невозмущенного Солнца.

В течение наблюдательной кампании 2008–2009 гг., после процедуры удаления помех, было получено более 2500 отсчетов плотности потока непрерывного радиоизлучения Солнца на частоте 20 МГц и почти 3200 отсчетов на частоте 25 МГц. Усредненные значения составили 710 и 860 Ян соответственно для этих частот при ошибке не более $\pm 18\%$. На рис. 2, а представлены данные различных измерений плотности

потока спокойного Солнца, в том числе и результаты наблюдений на УРАН-2, показанные жирными точками. Полученные значения плотности потока спокойного Солнца на частоте 25 МГц несколько ниже приведенных в работах [5] и [6]. Как уже отмечалось, наблюдения на радиотелескопе УРАН-2 выполнялись в отсутствие активных областей на диске Солнца, в то время как в работе [5] указывается на возможный их вклад в полученные значения. Как можно видеть на рис. 2, а, результаты измерений УРАН-2 в целом достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений других авторов [1–3, 5, 6, 13–18]. Сплошная линия на этом графике представляет аппроксимацию линейной зависимостью по всем точкам. В итоге спектральный индекс радиоизлучения спокойного Солнца в полосе частот $20 \div 200$ МГц равен -2.1 ± 0.1 , что очень близко к величине спектрального индекса длинноволнового излучения черного тела. Это объясняется тем, что угловые размеры источника растут с увеличением длины волны, а его яркостная температура падает на достаточно больших высотах.

Максимальная яркостная температура T_b рассчитана из значений плотности потока невозмущенного Солнца по формуле, приведенной в [13]:

$$T_b = 5.5 \cdot 10^{29} \frac{\lambda^2 S}{\theta_1 \theta_2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны в метрах; S – плотность потока, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$; θ_1 и θ_2 – экваториальные и полярные размеры солнечной короны, угл. мин.

На частоте 25 МГц для эллиптической короны с размерами $57' \times 41'$ [3] яркостная температура спокойного Солнца составила $2.9 \cdot 10^5$ К. Для частоты 20 МГц достоверных (измеренных) дан-

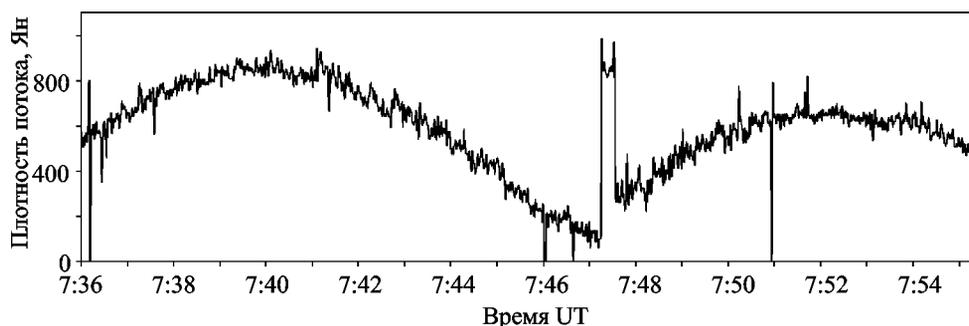


Рис. 1. Фрагмент регистрации радиоизлучения спокойного Солнца 13 июля 2008 г. с помощью УРАН-2 на частоте 25 МГц в полосе 250 кГц

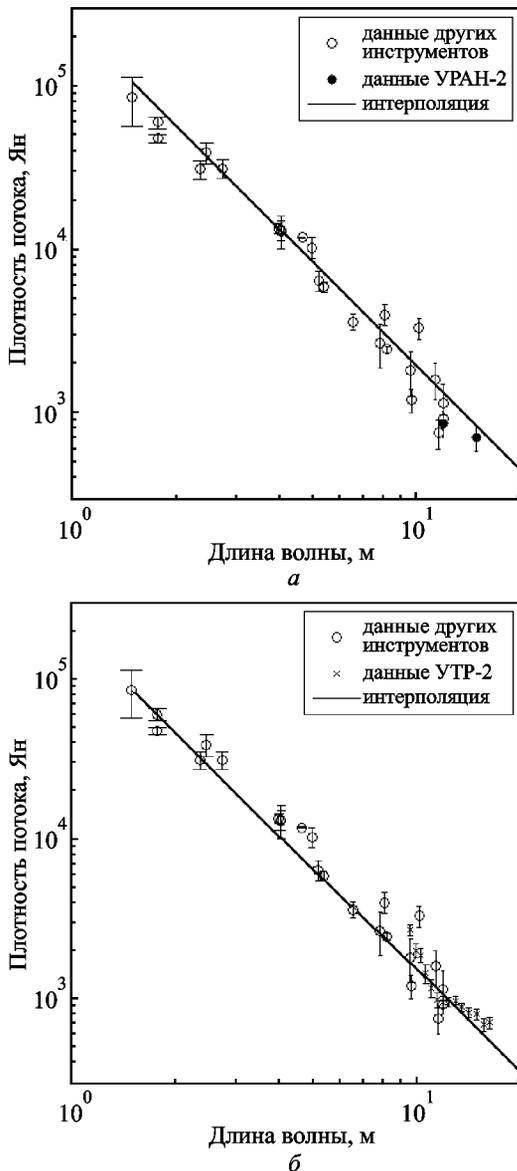


Рис. 2. Низкочастотная часть спектра (метровый и декаметровый диапазон длин волн) радиоизлучения спокойного Солнца: окружности – данные из работ [1–3, 5, 6, 13–18], крестики – данные наблюдений на УТР-2, жирные точки – результаты измерений на УРАН-2, сплошная линия – аппроксимация линейной зависимости ($\lambda^{-2.1}$)

ных о размере короны нам отыскать не удалось. На рис. 3 приведены данные о полярных и экваториальных размерах Солнца на частотах ниже 169 МГц из работ [1, 3, 6, 7, 14], в которых были получены его двумерные изображения во время минимальной фазы цикла активности. Экстраполируя эти данные, мы предполагаем, что на частоте 20 МГц корона имеет размер $62' \times 50'$. Тогда значение яркостной температуры равно $2.7 \cdot 10^5$ К.

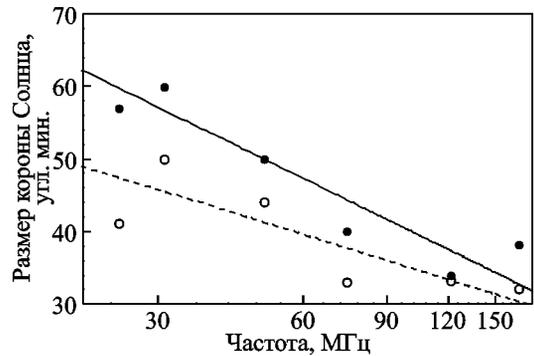


Рис. 3. Полярный (---) и экваториальный (—) угловые размеры короны Солнца в зависимости от частоты по данным из работ [1, 3, 6, 7, 14]

На рис. 4 пунктирной линией показана частотная зависимость яркостной температуры невозмущенного Солнца, построенная по данным работ [1, 3, 6, 7, 14] (кружочки) и полученным нами значениям (треугольнички). Истинная (электронная) температура значительно выше – несколько миллионов градусов. Полученное несоответствие отражает тот эффект, что корона на низких частотах является частично прозрачной, что будет рассмотрено более подробно ниже.

3.2. Наблюдения непрерывного солнечного радиоизлучения на УТР-2

Исследования радиоизлучения спокойного Солнца проводились с помощью антенной системы УТР-2 в период с 4 по 6 сентября 2010 г. Для получения сканов непрерывного солнечного излучения использовался пятилучевой режим диаграммы направленности телескопа УТР-2. Средний (третий) луч ориентировался на центр солнечного

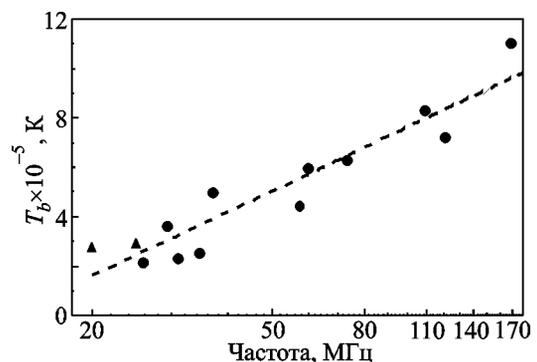


Рис. 4. Частотная зависимость яркостной температуры спокойного Солнца. Треугольничками обозначены данные, полученные на радиотелескопе УРАН-2

диска по склонению, а затем отворачивался от него по часовому углу. Длительность каждого скана составляла 30 мин. За это время солнечный диск, благодаря вращению Земли, пересекал главный лепесток диаграммы направленности телескопа. За указанный период наблюдений было получено более двадцати 30-минутных сканов. Измерения были выполнены в полосе частот $16.5 \div 33$ МГц с временным разрешением около 100 мс. На рис. 5 представлен пример амплитудно-временных профилей одного из сканов наблюдений радиоизлучения Солнца вдоль направления солнечного экватора для разных частот. Величины плотности потока принятого радиоизлучения определялись с помощью калибровки по известным значениям спектральной мощности генератора шума, а также с использованием расчета эффективной площади антенной системы УТР-2 в зависимости от положения Солнца на небесной сфере. Полученные профили хорошо аппроксимируются одномерной функцией Гаусса. Следует отметить, что на профилях присутствуют также интенсивные солнечные всплески. Однако они наблюдались достаточно редко и не искажали заметно форму регистрируемых профилей, что позволяло успешно проводить их селекцию. Динамический диапазон цифрового спектроанализатора DSPZ, используемого в качестве приемно-регистрирующего блока, был вполне достаточен, чтобы проводить одновременные наблюдения непрерывного излучения Солнца и солнечных всплесков.

На рис. 2, б показаны интегральные значения плотности потока радиоизлучения невозмущенного Солнца по данным наблюдений на УТР-2, а также представлены результаты других наблю-

дений в метровом–декаметровом диапазоне длин волн. Проведенная аппроксимация линейной зависимостью по всем точкам с помощью метода наименьших квадратов позволила найти спектральную зависимость плотности потока радиоизлучения спокойного Солнца. В результате спектральный индекс в полосе $18 \div 200$ МГц равен -2.1 ± 0.1 , что совпадает со значением индекса, установленным по измерениям на УРАН-2. При этом необходимо отметить, что исследования на радиотелескопе УТР-2 проводились в непрерывном диапазоне частот $16.5 \div 33$ МГц в отличие от наблюдений на УРАН-2 на двух изолированных частотах в узкой полосе. На графике (см. рис. 2, а) нанесены 24 значения полного потока непрерывного радиоизлучения, указанные в работах [1–3, 5, 6, 13–18] в полосе частот $26 \div 200$ МГц, и лишь два значения по данным УРАН-2 на частотах 20 и 25 МГц. Очевидно, что многочастотные исследования являются более информативными и эффективными.

В табл. 1 приведены средние интегральные плотности потока радиоизлучения спокойного Солнца на частотах 20 и 25 МГц, рассчитанные по наблюдательным данным, полученным с помощью антенной системы УРАН-2, а также для сравнения результаты измерений на радиотелескопе УТР-2. На указанных частотах плотность потока, измеренная на УТР-2, имеет большие значения. Это может быть следствием нескольких факторов. Указанные в табл. 1 данные для УРАН-2 представляют собой среднегодовые значения плотности потока непрерывного радиоизлучения спокойного Солнца, а данные для УТР-2 получены за существенно более короткий период.

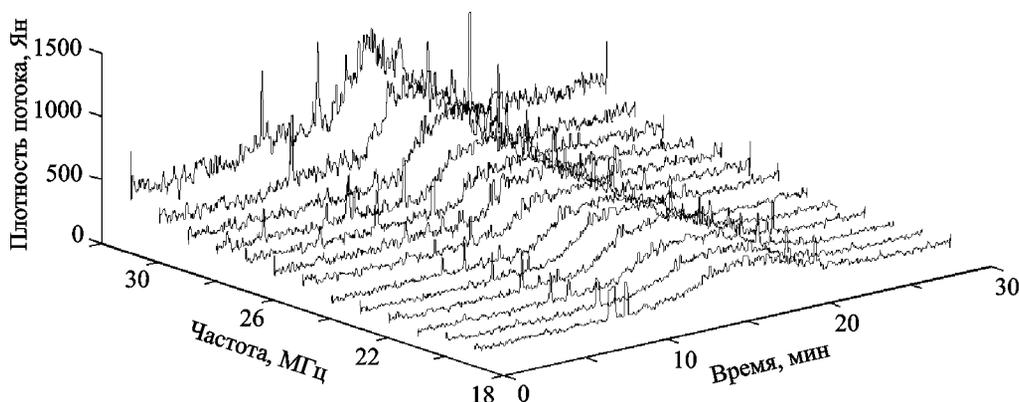


Рис. 5. Амплитудно-временные профили скана радиоизлучения короны спокойного Солнца, измеренного с помощью радиотелескопа УТР-2 (5 сентября 2010 г.). Начало отсчета по оси времени соответствует 09:01:59 UT

Таблица 1. Средние значения плотности потока радиоизлучения спокойного Солнца

Радиотелескоп	Год	Поток, Ян	
		20 МГц	25 МГц
УРАН-2	2008	710	870
	2009	700	860
УТР-2	2010	800	950

Кроме того, на 2008–2009 гг. приходился ожидаемый минимум солнечной активности, а в 2010 г. должна была наступить нарастающая фаза 11-летнего цикла. Однако, как известно, минимум последнего солнечного цикла был затянувшимся и самым продолжительным с начала XX века. Поэтому наблюдения 2010 г. показали, с одной стороны, близость к минимальной фазе цикла солнечной активности и в то же время тенденцию к росту активности.

Для расчета углового размера радиоизображения Солнца учитывалась форма диаграммы направленности антенной решетки УТР-2. Кроме того, как было показано на рис. 5, одномерные сканы спокойного Солнца аппроксимируются функцией Гаусса. Далее мы использовали хорошо известную формулу для определения экваториального диаметра солнечной короны [13]:

$$\theta_s = \sqrt{\theta_o^2 - \theta_b^2},$$

где θ_s – угловой размер источника (солнечной короны), θ_o – угловой размер одномерного профиля (скана), θ_b – угловой размер главного лепестка диаграммы направленности радиотелескопа. Все значения угловых величин были определены по уровню половинной мощности. При этом величина экваториального диаметра уменьшается с нарастанием частоты (см. рис. 5), что соответствует радиоизлучению короны спокойного Солнца на плазменных частотах, отвечающих разным высотам (слоям) солнечной короны.

На рис. 6 представлена частотная зависимость угловой величины экваториального диаметра невозмущенного Солнца на частотах ниже 100 МГц. Данные об угловом размере радиоизображения спокойного Солнца в метровом – декаметровом диапазонах длин волн являются крайне ограниченными в силу упомянутых выше причин. Хотя измеренные нами значения заметно варьируются, после аппроксимации кривой (см. рис. 6) было

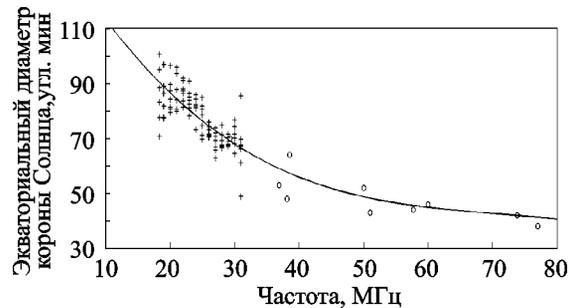


Рис. 6. Угловые величины экваториального диаметра короны Солнца в зависимости от частоты: окружности – данные других авторов, крестики – результаты измерений на УТР-2, сплошная линия – интерполяция по всем точкам

получено вполне удовлетворительное соотношение, которое описывается полиномом третьей степени. Задача нахождения зависимости экваториального диаметра солнечной короны от частоты не является новой. Например, в работе [7] были проведены наблюдения спокойного Солнца на трех частотах: 30.9, 50.0 и 73.8 МГц. В результате было установлено, что и полярный, и экваториальный диаметры (D) увеличиваются с понижением частоты (f) по степенному закону $D \sim f^\alpha$, где $\alpha = -0.26$ для экваториального диаметра и $\alpha = -0.27$ – для полярного. Можно предположить, что такой вид зависимости является следствием использования данных измерений только на нескольких доступных частотах.

Полученные нами значения экваториального диаметра короны спокойного Солнца расширяют наши представления о ней и составляют 2–3 радиуса Солнца. Известно, что форма короны Солнца в годы минимума 11-летнего цикла активности представляет собой эллипс, вытянутый вдоль солнечного экватора. Независимо и практически одновременно эта особенность была обнаружена как по результатам наблюдений солнечных затмений в 1951 и в 1952 гг. на длине волны 177 см [19], так и на основании интерферометрических наблюдений в этот же период на длинах волн 1.4, 3.7 и 7.9 м [20]. Для характеристики соотношения полярного диаметра к экваториальному вводится коэффициент эллиптичности распределения радиояркости солнечной короны. На частоте 25 МГц он оказывается равным примерно 0.72 [15], это значение учитывалось нами при расчете полярного диаметра солнечной короны в полосе 16.5 ÷ 33 МГц.

Моделирование радиоизлучения спокойного Солнца в задачах астрофизики является сравнительно простым случаем. Это обусловлено, во-первых, тем, что такое это излучение имеет тепловой характер. Во-вторых, сам механизм излучения является тормозным (электронов на ионах) в присутствии относительного слабого магнитного поля. Электроны в данном случае находятся в состоянии локального термодинамического равновесия, а, значит, функция источника излучения выражается через функцию Планка. Поэтому можно применить приближение Рэлея–Джинса и выразить интенсивность излучения через яркостную температуру T_b , а функцию Планка – через электронную температуру T_e . В таком случае уравнение переноса излучения принимает вид

$$T_b = \int_0^{\tau} T_e(x) e^{-x} dx,$$

где $T_e(x)$ – распределение электронной температуры вдоль луча зрения, τ – оптическая толщина. В короне (особенно в верхней ее части) электронная температура практически не изменяется. Поэтому можно использовать более простое выражение

$$T_b = T_e(1 - e^{-\tau}), \quad (2)$$

в котором оптическая толщина определяется из соотношений [21]:

$$\tau = \int_0^s K ds, \quad K = \frac{0.16 N_e^2}{f^2 n T^{3/2}}, \quad n = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}. \quad (3)$$

Интегрирование в (3) проводится вдоль суммарной длины пути, пройденного лучом; K – линейный коэффициент поглощения; N_e – электронная плотность; f – частота наблюдения; n – показатель преломления; T_e – электронная температура; f_p – плазменная частота. Если оптическая толщина большая ($\tau(f) \gg 1$), и, следовательно, $e^{-\tau(f)} \ll 1$, то плазма считается практически непрозрачной для радиоволн. В противном случае ($\tau(f) \ll 1$) и она становится почти прозрачной средой. Расчеты показывают, что солнечная корона будет оптически толстой средой на низких частотах ($\lambda > 2.5$ м) [22, 23]. Проведенная оценка на длине волны 12 м – $\tau(25 \text{ МГц}) \approx 11$, и, следовательно $e^{-11} \approx 10^{-5}$ – является этому подтверж-

дением. Таким образом, согласно формуле (2) экспериментально полученные значения яркостной температуры должны быть приближенно равны электронной температуре $T_b \approx T_e$. Однако наблюдаемые значения T_b на разных длинах волн в метровом и декаметровом диапазонах не совпадают с T_e и практически всегда оказываются заметно ниже, чем $T_e \approx 10^6$ К, примерно на порядок. Такое несоответствие известно давно и часто упоминается в работах по исследованию непрерывного излучения спокойного Солнца [5, 13, 14, 21, 23–27]. Предлагаются различные тому объяснения, но единой точки зрения по этому вопросу пока нет.

Для определения яркостной температуры солнечной короны мы пользовались формулой (1). Рассчитанные значения на частотах 20 и 25 МГц составляют $1.91 \cdot 10^5$ и $2.26 \cdot 10^5$ К соответственно и примерно на 30 % меньше значений, полученных в результате наблюдений на УРАН-2 ($2.7 \cdot 10^5$ и $2.9 \cdot 10^5$ К). Возможно, такой результат является следствием того, что угловые размеры короны Солнца в этом диапазоне частот были получены из анализа данных измерений на радиотелескопе УТР-2, а не с помощью процедуры интерполяции по уже известным значениям, которые наблюдались на более высоких частотах с помощью других инструментов и в других экспериментальных условиях. При этом следует заметить, что экваториальный диаметр после обработки одномерных сканов, полученных на УТР-2 в полосе $16.5 \div 33$ МГц, принимает значения, которые достаточно хорошо согласуются с данными других авторов на частотах ниже 100 МГц (см. рис. 6). Как можно видеть, кинетическая температура электронов оказывается значительно выше полученных величин яркостной температуры как по результатам измерений на УТР-2, так и на УРАН-2. В литературе для объяснения этого эффекта делается предположение о рассеянии радиоволн на корональных неоднородностях [13, 28–30], что приводит к частичной прозрачности короны. При этом понижается яркостная температура и увеличиваются угловые размеры короны Солнца. Поскольку такое рассеяние пропорционально квадрату длины волны, оно дает более заметный вклад на низких частотах, чем на высоких. Следует также упомянуть, что, к сожа-

лению, эта гипотеза не приводит к полному согласию между теоретическими расчетами и экспериментальными данными, поэтому в работах [14, 15, 24] можно встретить другие точки зрения на эту проблему.

4. Выводы

В работе получены значения плотности потока континуального радиоизлучения Солнца по наблюдениям в декаметровом диапазоне волн в течение летних сезонов 2008–2009 гг. на антенной системе УРАН-2 и в летне-осенний период 2010 г. по наблюдениям на радиотелескопе УТР-2. По данным, полученным на УРАН-2 и УТР-2, был найден спектральный индекс, который в полосе частот $16.5 \div 200$ МГц принимает значение -2.1 ± 0.1 . Значения яркостной температуры короны спокойного Солнца в этом диапазоне частот заметно ниже ее электронной температуры, что указывает на ее частичную прозрачность. Угловые размеры экваториального диаметра радиоизображения Солнца в непрерывной полосе $16.5 \div 33$ МГц были найдены по результатам наблюдений на радиотелескопе УТР-2 и составляют в среднем от 90 до 65 угловых минут.

В настоящее время наблюдения континуального радиоизлучения спокойного Солнца на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 продолжаются. Это позволит исследовать изменения радиоизлучения невозмущенного (или слабо возмущенного) Солнца на разных фазах солнечного цикла. Построение радиоизображения солнечной короны и исследование его динамики на декаметровых волнах на крупнейших радиотелескопах позволят уточнить физические модели солнечной короны [31, 32] и выявить специфические процессы в ней. Результаты наблюдений, представленные в этой работе, дают возможность более точно определить плотность потока континуального излучения Солнца в декаметровом диапазоне длин волн, что не удавалось сделать ранее. Этому способствует, в частности, применение двух различных антенн, работающих в одном и том же диапазоне волн.

Авторы благодарны В. А. Шепелеву и Н. Н. Калининченко за полезные замечания, а также Я. В. Мирошниченко за разработку программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leblanc Y. and Le Squeren A. M.* Dimensions, Temperature and Electron Density of the Quiet Corona. Their Variations during the Solar Cycle // *Astron. Astrophys.* – 1969. – Vol. 1. – P. 239–248.
2. *Lantos P. and Avignon Y.* The Metric Quiet Sun during Two Cycles of Activity and the Nature of the Coronal Holes // *Astron. Astrophys.* – 1975. – Vol. 41, No. 2. – P. 137–142.
3. *Bazelyan L. L., Braude S. Ya., and Men' A. V.* Scattering of the Decameter Radio Emission of the Crab Nebula by the Solar Corona // *Sov. Astron.* – 1970. – Vol. 14, No. 1. – P. 153–162.
4. *Cronyn W. M. and Erickson W. C.* The Flux and Brightness Distribution of the Sun at 26.3 Mc/sec // *Astron. J.* – 1965. – Vol. 70. – P. 672.
5. *Erickson W. C., Gergely T. E., Kundu M. R., and Mahoney M. J.* Determination of the Decameter Wavelength Spectrum of the Quiet Sun // *Sol. Phys.* – 1977. – Vol. 54, No. 1. – P. 57–63.
6. *Kundu M. R., Gergely T. E., and Erickson W. C.* Observations of the Quiet Sun at Meter and Decameter Wavelengths // *Sol. Phys.* – 1977. – Vol. 53, No. 2. – P. 489–496.
7. *Gergely T. E., Gross B. D., and Kundu M. R.* The Diameter of the Sun at Decameter Wavelengths // *Sol. Phys.* – 1985. – Vol. 99, No. 1-2. – P. 223–231.
8. *Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г.* Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны.* – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–15.
9. *Абранин Э. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А.* Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2 // *Радиофизика и радиоастрономия* – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 95–102.
10. *Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Denis L.* A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – P. 16–28.
11. *Brazhenko I., Bulatsen V. G., Vashchishin R. V., Frantsuzenko A. V., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Abranin E. P., Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Lecacheux A., and Rucker H. O.* New Decameter Radiopolarimeter URAN-2 // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. Suppl.* – 2005. – Vol. 5. – P. 43–46.
12. *Viner M. R. and Erickson W. C.* 26.3-MHz radio source survey. II. Radio source positions and fluxes // *Astron. J.* – 1975. – Vol. 80, No. 11. – P. 931–954.
13. *Aubier M., Leblanc Y., and Boisshot A.* Observations of the Quiet Sun at Decameter Wavelengths – Effects of Scattering on the Brightness Distribution // *Astron. Astrophys.* – 1971. – Vol. 12. – P. 435–441.
14. *Ramech R.* Low Frequency Radio Emission from the “Quiet” Sun // *J. Astrophys. Astr.* – 2000. – Vol. 21, No. 3–4. – P. 237–240.
15. *Абранин Э. П., Базелян Л. Л.* Декаметровое излучение спокойного Солнца: Препр. / Институт радиофизики и электроники АН УССР; № 304. – Харьков: 1986. – 32 с.

- <<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/19/064/19064995.pdf>>.
16. Borkowski K. The quiet Sun brightness temperature at 127 MHz // *Sol. Phys.* – 1982. – Vol. 81, No. 2. – P. 207–215.
 17. Fokker A. D. The electron temperature of the solar corona as derived from radio observations // *Bull. Astr. Inst. Netherlands.* – 1966. – Vol. 18. – P. 359–366.
 18. Subramanian K. R. and Sastry Ch. V. The Low-Frequency Radio Spectrum of the Continuum Emission from the undisturbed Sun // *J. Astrophys. Astr.* – 1988. – Vol. 9, No. 4. – P. 225–229.
 19. Denisse J. F., Blum E. J., and Steinberg J. L. Radio Observations of the Solar Eclipses of September 1, 1951, and February 25, 1952 // *Nature.* – 1952. – Vol. 170, Iss. 4318. – P. 191–192.
 20. O'Brien P. A. The distribution of radiation across the solar disk at metre wave-lengths // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1953. – Vol. 113. – P. 597–612.
 21. Thejappa G., and Kundu M. K. Unusually low coronal radio emission at the solar minimum // *Sol. Phys.* – 1992. – Vol. 140, No. 1. – P. 19–39.
 22. Sheridan K. V. and Dulk G. A. Radio observations of coronal holes // *Proc. of Symp. "Solar and interplanetary dynamics".* – Cambridge, Mass. (USA) – 1979. – P. 37–43.
 23. Sastry Ch. V. Observations of the Continuum Radio Emission from the Undisturbed Sun at a Wavelength of 8.7 Meters // *Sol. Phys.* – 1994. – Vol. 150, No. 1–2. – P. 285–294.
 24. Subramanian K. R. Brightness temperature and size of the quiet Sun at 34.5 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 426, No. 1. – P. 329–331.
 25. Sastry Ch. V., Dwarkanath K. S., Shevgaonkar R. K., and Krishan V. Observations and interpretation of the slowly varying component of solar radio emission at decameter wavelengths // *Sol. Phys.* – 1981. – Vol. 73, No. 2. – P. 363–377.
 26. Sastry Ch. V., Shevgaonkar R. K., and Ramanuja M. N. Observations on the slowly varying component of solar radio emission at decameter wavelengths // *Sol. Phys.* – 1983. – Vol. 87, No. 2. – P. 391–399.
 27. Sheridan K. V. Radio observations of the structure of the solar corona // *Proc. Astron. Soc. Aust.* – Vol. 1. – 1970. – P. 304–305.
 28. Fokker A. D. Coronal scattering of radiation from solar radio sources // *Bull. Astron. Inst. Netherlands.* – 1965. – Vol. 18. – P. 111–124.
 29. Steinberg J. L., Aubier-Giround M., Leblanc Y., and Boisshot A. Coronal scattering, absorption and refraction of solar radio-bursts // *Astron. Astrophys.* – 1971. – Vol. 10, No. 3. – P. 362–376.
 30. Thejappa G. and MacDowall R. J. Effects of scattering on radio emission from the quiet Sun at low frequencies // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 676, Is. 2. – P. 1338–1345.
 31. Mann G., Jansen F., MacDowall R. J., Kaiser M. L., and Stone R. G. A heliospheric density model and type III radiobursts // *Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 348, No. 2. – P. 614–620.
 32. Newkirk G. The Solar Corona in Active Regions and the Thermal Origin of the Slowly Varying Component of Solar Radio Radiation // *Astrophys. J.* – 1961. – Vol. 133. – P. 983–1013.
- A. I. Браженко¹, А. О. Коваль², О. О. Коноваленко², О. О. Станіславський², [Е. П. Абраїні]², В. В. Доровський², В. М. Мельник², Р. В. Ваїцишин¹, А. В. Французенко¹, О. В. Борисюк¹*
- ¹Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. Субботіна НАН України, вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36029, Україна
- ²Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна
- ОСОБЛИВОСТІ КОНТИНУАЛЬНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЕРХНЬОЇ КОРОНИ СОНЦЯ У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ
- Надаються результати досліджень радіовипромінювання спокійного Сонця у декаметровому діапазоні довжин хвиль. Спостереження виконані за допомогою антени УРАН-2 в літні сезони 2008–2009 рр. на частотах 20 і 25 МГц у смузі 250 кГц та на радіотелескопі УТР-2 в літньо-осінній період 2010 р. у смузі частот 16.5÷33.0 МГц у режимі одномірного геліографа. Усереднені значення щільності потоку випромінювання спокійного Сонця за даними вимірів на УРАН-2 становлять 860 Ян на 25 МГц та 710 Ян на 20 МГц. Величини інтегральної щільності потоку випромінювання за вимірами на радіотелескопі УТР-2 для цих частот склали 950 і 800 Ян відповідно. Спектральний індекс у діапазоні частот 16.5÷200 МГц з урахуванням спостережень на інструментах УТР-2 та УРАН-2 виявився однаковим і становить -2.1 ± 0.1 . Визначено кутові значення екваторіального діаметру сонячної корони за результатами спостережень на УТР-2. Вони добре узгоджуються зі значеннями, відомими для континуального випромінювання Сонця на вищих частотах. Показано ефективність скоординованого (або одночасного) використання різних територіально рознесених радіотелескопів, що мають співпадаючий діапазон частот.
- A. I. Brazhenko¹, A. A. Koval², A. A. Konovalenko², A. A. Stanislavsky², [E. P. Abranin]², V. V. Dorovskyy², V. N. Melnik¹, R. V. Vashchishin¹, A. V. Frantuzenko¹, and O. V. Borysyuk¹*
- ¹Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36029, Ukraine
- ²Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- PECULIARITY OF CONTINUUM EMISSION FROM UPPER CORONA OF THE SUN AT DECAMETER WAVELENGTHS
- The results of investigations of the quiet Sun radio emission at decameter wavelengths are suggested. The observations have been made with the URAN-2 antenna array in summer seasons of 2008–2009 at 20 and 25 MHz within 250 kHz bandwidth together with the UTR-2 radio telescope in the summer-autumn period of 2010 at 16.5 to 33.0 MHz in the mode of one-

dimensional heliograph. The average values of flux density of the quiet Sun corona according to URAN-2 measurements is equal to 860 Jy at 25 MHz and 710 Jy at 20 MHz. The values of integral flux density from UTR-2 measurements for these frequencies are 950 and 800 Jy, respectively. The URAN-2 and UTR-2 measured data as respects the spectral index within $16.5 \div 200$ MHz have shown it to be the same and equal to -2.1 ± 0.1 . The angular sizes of equatorial diameter of solar

corona have been determined from the UTR-2 observations. The results yielded are in good agreement with the values known for the continuum radiation from the solar corona at higher frequencies. The efficiency of simultaneous application of different geographically spaced radiotelescopes with coincident frequency range is shown, too.

Статья поступила в редакцию 03.11.2011