

**ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА СОЛНЦА
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗАТМЕНИЯ 10.06.2021 г.
В ДИАПАЗОНЕ ЛИНИИ ВОДЯНОГО ПАРА (1.35 см)**

Ильин Г.Н.¹, Быков В.Ю.¹, Петерова Н.Г.², Топчило Н.А.³

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский филиал САО РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

**BRIGHTNESS TEMPERATURE OF THE SUN
ACCORDING TO OBSERVATION OF ECLIPSE 10.06.2021
IN RANGE OF WATER VAPOR LINE (1.35 cm)**

Ilin G.N.¹, Bykov V.Yu.¹, Peterova N.G.², Topchilo N.A.³

¹IAA RAS, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg Branch of SAO RAS, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The study of solar microwave radiation by the method of observing solar eclipses is continued [Ivanov et al., 2021]. New results of processing complex observations of the solar eclipse of June 10, 2021, made for the first time at the Svetloe observatory together with the water vapor radiometer (WVR) and the RT-13 radio telescope, are presented. Assuming a uniform distribution of brightness, high-precision values of the effective brightness temperature of the radiation from the solar disk at frequencies of 20.7 and 31.4 GHz were obtained: $T_B(20.7) = 9060 \pm 380$ K, $T_B(31.4) = 8050 \pm 300$ K, respectively.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-131-134

Солнечные затмения, несмотря на длительную историю наблюдений, продолжают оставаться одним из важных инструментов исследования физики Солнца. В радиодиапазоне они позволяют решать главную проблему – недостаток углового разрешения. Благодаря более слабой, по сравнению с обычными радиотелескопами, зависимости разрешения от длины волны ($\sim \lambda^{-1/2}$), затмения позволяют эффективно выполнять наблюдения и с использованием антенн очень малых размеров. В докладе представлены результаты наблюдения солнечного затмения с помощью радиометра водяного пара (РВП) ИПА РАН.

В обычном режиме, РВП [Arsaev et al., 2017] предназначен для измерения поглощения космического излучения в земной атмосфере в диапазоне линии водяного пара (1,35 см) и направлен в зенит, но его последняя конструкция (РВП-4) имеет возможность наведения антенной системы в заданную точку небесной полусферы и автоматического сопровождения источника космического радиоизлучения (в частности Солнца). Наблюдения ведутся на двух частотах – $20,7 \pm 0,25$ ГГц (канал А) и $31,4 \pm 0,5$ ГГц (канал Б), расположенных с разных сторон от линии водяного пара.

На рис. 1 показан вид РВП и приведены его технические характеристики.

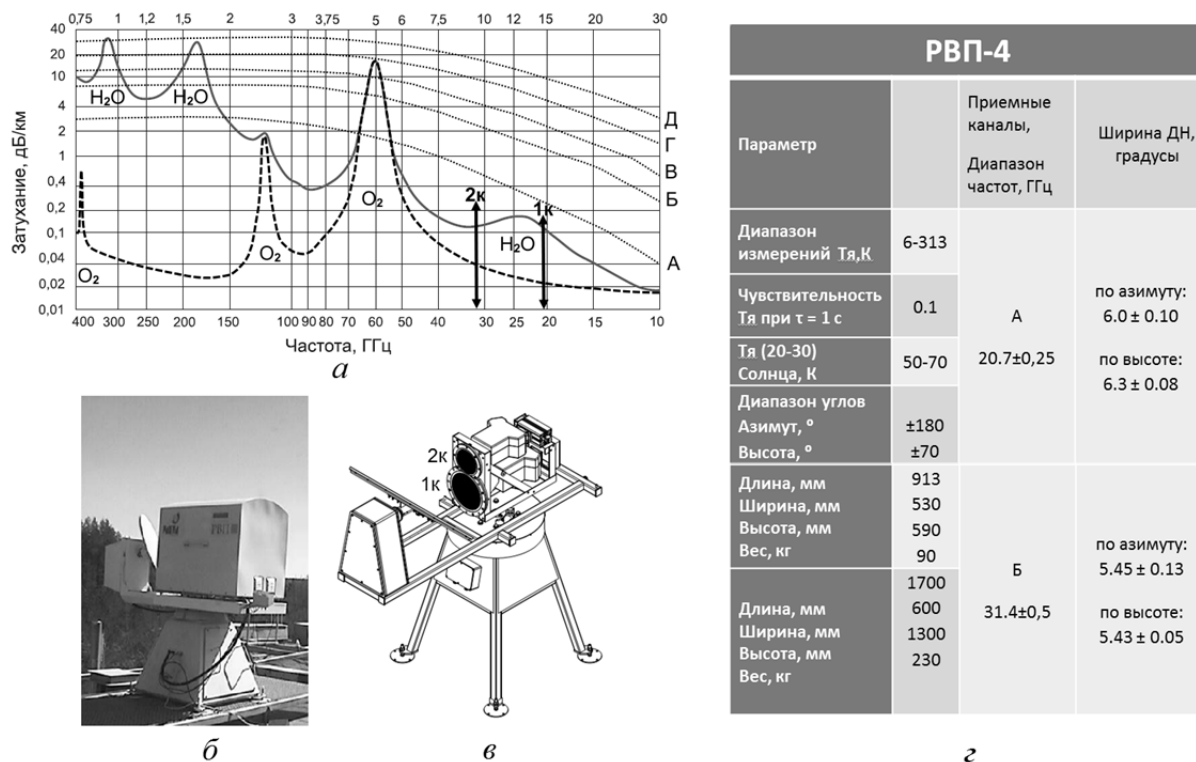


Рис. 1. (а) – величина поглощения сигнала в земной атмосфере в миллиметровом диапазоне волн для стандартной модели атмосферы (учтены главные газы составляющие – H_2O и O_2). На кривой поглощения стрелками (1к, 2к) отмечены положения рабочих частот РВП. (б) – общий вид РВП-4 в режиме слежения за Солнцем. (в) – схема расположения блоков СВЧ приемников РВП с первичным облучателем в виде двух конических рупорно-линзовых антенн (РЛА). 1к– канал А (20,7 ГГц), 2к– канал Б (31.4 ГГц). (г) Технические параметры РВП-4.

В результате наблюдений были получены затменные кривые, анализ которых показал, что в целом, ход затменной кривой на РВП хорошо аппроксимируется кривой покрытия площадей – величиной незакрытой площади Солнца в оптике (см. рис. 2, жирная черная кривая).

Расчетную кривую можно рассматривать как нижнюю границу для кривых, полученных при наблюдении. Особенно хорошо расчетная кривая и наблюдаемые кривые совпадают в период времени (11:30–11:50) UT, когда их различие составляет менее 2%. Такое совпадение, несмотря на довольно высокий уровень помех, позволяет на частотах 20.7 и 31.4 ГГц моделировать Солнце равномерно светящимся диском и определить среднюю величину его яркостной температуры $T_B(f)$ (f – частота наблюдения) по известной формуле:

$$T_B = T_A * \Omega_{\text{ант}} / \Omega_{\text{ист}},$$

где T_B и T_A – яркостная и антенная температура источника (Солнца), $\Omega_{\text{ант}}$ – телесный угол диаграммы направленности антенны (использовались ха-

рактеристики РВП из табл. 1), $\Omega_{\text{ист}}$ – телесный угол источника (диска Солнца). Расчеты показали: $T_B(20.7) = 9060 \pm 380$ К, $T_B(31.4) = 8050 \pm 300$ К. Полученные значения согласуются с нижней оценкой яркостной температуры по литературным данным [Нагнибеда и Пиотрович, 1987; Лукичева, 2005] (см. рис. 3), что соответствует ожиданиям для периода минимума солнечной активности.

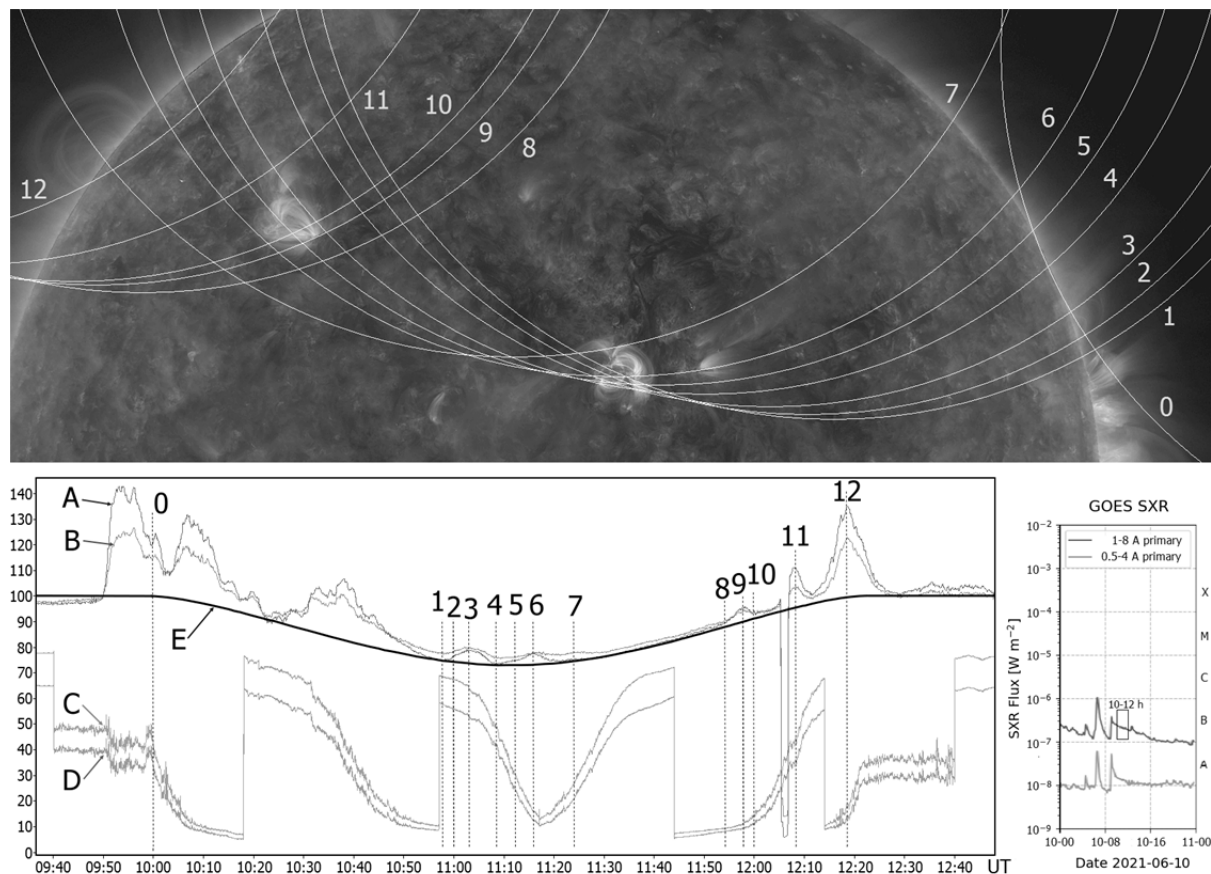


Рис. 2. Затменные кривые, полученные на РВП на частотах 20.7 ГГц (А) и 31.4 ГГц (В) и на радиотелескопе РТ-13 на частоте (28–28.5) ГГц (С и D – правая и левая поляризации). Кривые совмещены по времени и сопоставлены с данными GOES (правый график, данные сайта www.SolarMonitor.org). Е – кривая покрытия площадей представлена в одном масштабе с кривыми А и В. Числами (0–12) на затменных кривых отмечены характерные моменты времени. Для этих моментов на верхнем снимке (SDO/AIA, линия 171 Å) показаны положения лимбов Луны.

Основное достоинство полученных результатов состоит в том, что величина антенной температуры T_A измерена в условиях наблюдений Солнца, когда реализуется реальное значение эффективной диаграммы направленности (ДН) РВП, и не требуется знание формы ДН, ни модельное, ни даже известное из лабораторных измерений.

Видимые на затменной кривой РВП помехи обусловлены неравномерностью облачности в направлении Солнца, которая может быть оценена и использована для коррекции параллельных наблюдений на больших

телескопах, где ее влияние невозможно отделить от особенностей полезного сигнала.

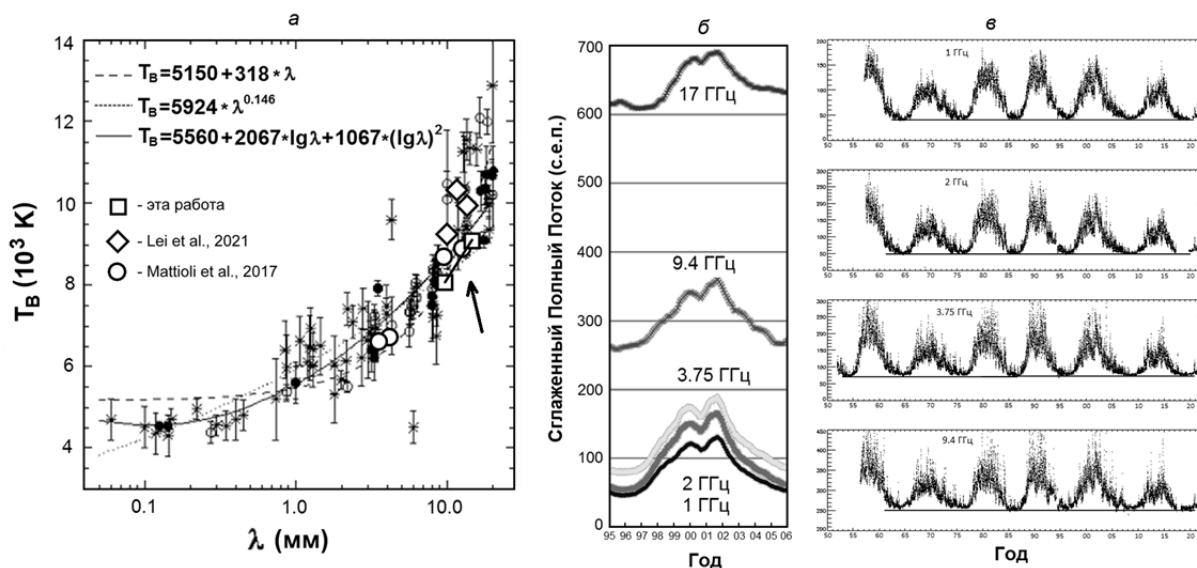


Рис. 3. (а) – измерения яркостной температуры спокойного Солнца в мм-диапазоне и их аппроксимации [Лукичева, 2005], Новые данные РВП указаны стрелкой. (б) – полный поток Солнца по наблюдениям обсерватории Нобейяма (<https://solar.nro.nao.ac.jp/norpr/>) в 23-м и 24-м солнечных циклах на 1–17 ГГц. (в) – полный поток Солнца в диапазоне 1–9.4 ГГц в обсерваториях Тоякава и Нобейяма с 50-х годов по текущее время (6 солнечных циклов). На каждой частоте проведен минимальный фоновый уровень.

В результате наблюдений получены высокоточные значения яркостной температуры излучения диска Солнца на частотах 20.7 и 31.4 ГГц – $T_B(20.7) = 9060 \pm 380$ К, $T_B(31.4) = 8050 \pm 300$ К соответственно. И сделан вывод, что в диапазоне частот (20.7–31.4) ГГц, как и в диапазоне 1–17 ГГц, величина яркостной температуры Солнца в период прошедшего глубокого минимума 11-летнего цикла солнечной активности осталась неизменной (не зависящей от номера солнечного цикла). Поэтому говорить о радикальных изменениях радиоизлучения Солнца на этапе 25-го цикла преждевременно.

Литература

- Иванов Д.В., Ипатов А.В., Рахимов И.А., и др. Первые результаты радио наблюдений солнечного затмения 10.06.2021 г. в обсерваториях «Светлое» и «Бадары» // Труды XXV Всеросс. ежегод. конф. по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2021», 4-8 октября 2021 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2021, с.143-146.
- Лукичева М.А. Структура и динамика солнечной хромосферы на основе наблюдений в миллиметровом диапазоне // Дисс. к.ф-м.н. СПб. 2015.
- Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. Радиоизлучение Солнца в миллиметровом диапазоне волн // Труды Астр. Обс. ЛГУ. Т.41, С. 5-80. 1987.
- Arsaev I.E., Bykov V.Yu., Il'in G.N., Yurchuk E.F. Water Vapor Radiometer: Measuring Instrument of Atmospheric Brightness Temperature // Measurement Techniques. V. 60. Iss. 5. P. 497–504. 2017.