

УДК 523.9-335.7+520.86

НАБЛЮДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 10.06.2021 г. НА РАДИОМЕТРЕ ВОДЯНОГО ПАРА ИПА РАН

© 2023 г. Г. Н. Ильин¹, *, В. Ю. Быков¹, Н. Г. Петерова², **, Н. А. Топчило³, ***

¹Институт прикладной астрономии РАН (ИПА РАН),
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН (СПбФ САО РАН),
Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: igen@iaaras.ru

**e-mail: peterova@yandex.ru

***e-mail: topchilona@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.06.2022 г.

После доработки 23.08.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Приведены результаты наблюдений солнечного затмения 10.06.2021 г., выполненных в обсерватории “Светлое” (60.53° N, 29.78° E, Ленинградская обл.) впервые совместно с помощью радиометра водяного пара и радиотелескопов РТ-13 и РТ-32. Затменные кривые, полученные на рабочих частотах радиометра 20.7 и 31.4 ГГц, сопоставлены с изменением площади открытой части Солнца и показали их хорошее согласие (совпадение с точностью до 2% в период отсутствия облаков). В предположении о равномерном распределении радиояркости по диску Солнца выполнена оценка его яркостной температуры, составившая на этих частотах 9060 ± 380 и 8050 ± 300 К соответственно. Сделан вывод, что и в эпоху глубокого минимума солнечной активности яркость солнечного диска в микроволновом диапазоне остается неизменной (не зависимой от номера цикла).

DOI: 10.31857/S0016794022600569, EDN: ACWPDD

1. ВВЕДЕНИЕ

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. Практически затмение представляет собой аналог обычных наблюдений на радиотелескопе, но с очень узкой ножевой диаграммой направленности. Кроме того, у затменных наблюдений есть очень существенное преимущество — более слабая зависимость разрешения от длины волны ($\sim \lambda^{-1/2}$), что важно при наблюдении на длинных волнах. Наиболее полно реализовать эти преимущества позволяют наблюдения затмений на крупных инструментах (с диаметром зеркала более 10 м), с помощью которых удается выделить на Солнце отдельный объект и таким образом ограничить вклад спокойного Солнца, который в данной задаче является помехой. Этот метод можно считать наилучшим вариантом “квазиулевого” способа регистрации сигнала для ис-

следования структуры слабых деталей источника излучения.

Впервые крупный полноповоротный радиотелескоп был применен для наблюдений солнечного затмения 1966 г. [Апушкинский и Нагнибеда, 1972; Гельфрейх и др., 1972], послуживших началом развития особого “затменного” метода исследований радиоизлучения Солнца. К подобным телескопам относится и сеть радиотелескопов “Квазар-КВО” ИПА РАН [Финкельштейн и др., 2005], в составе которой работают 4 географически удаленные радиоастрономические обсерватории (РАО) — “Светлое”, “Зеленчукская”, “Бадары” и “Уссурийская АО” (<https://iaaras.ru/quasar/>). Наблюдения Солнца на крупных телескопах РСДБ комплекса “Квазар-КВО” ведутся в режиме, когда входящие в ее состав инструменты РТ-32 и РТ-13 используются как одиночные зеркала и применяются в основном для наблюдений солнечных затмений. Исследования Солнца были начаты в 1999 г., и затмение 10.06.2021 г. — это восьмой случай. Именно с помощью радиотелескопа с диаметром зеркала 32 м (РТ-32) впервые

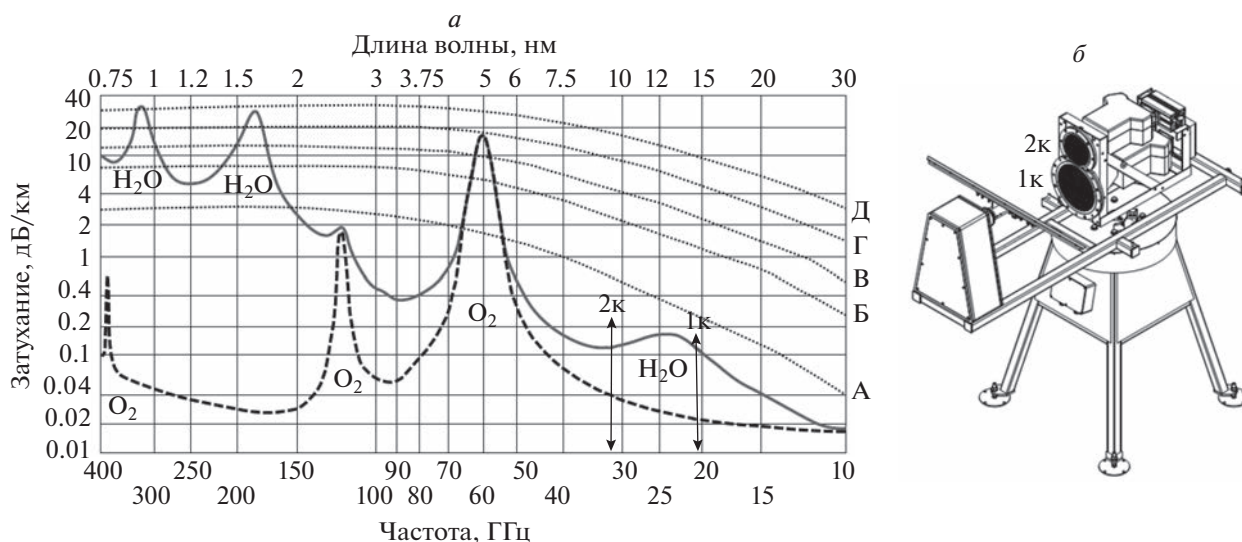


Рис. 1. (а) — величина поглощения сигнала в земной атмосфере в миллиметровом диапазоне волн. Сплошная кривая — затухание для стандартной модели атмосферы (учтены главные газовые составляющие — H_2O и O_2). Штриховая кривая — затухание в “сухой атмосфере” (без паров воды). Пунктирные кривые А–Д — поглощение в жидкой фазе воды (в дожде): А — 0.25 мм/ч (слабый дождь), Б — 12.5 мм/ч (умеренный дождь), В — 25 мм/ч (сильный дождь), Г — 50 мм/ч (ливень), Д — 100 мм/ч (тропический ливень). Двойными стрелками (1к, 2к) отмечены положения рабочих частот РВП. (б) — схема расположения блоков СВЧ-приемников РВП с коническими РЛА. 1к — канал А (20.7 ГГц), 2к — канал Б (31.4 ГГц).

было достигнуто максимальное эффективное угловое разрешение затменных наблюдений $\sim(1-3)''$ на микроволнах [Финкельштейн и др., 2012].

ИПА РАН имеет также два малых инструмента, принимавших участие в наблюдении затмений. Это 1.5-метровый радиотелескоп РТ-2 в “Уссурийская АО” и радиометр водяного пара (РВП) [Arsaev et al., 2017], впервые принявший участие в наблюдениях затмения 10.06.2021 г. Малые инструменты, для которых Солнце является почти точечным источником, обладают своими специфическими преимуществами: не требуется заранее выбирать конкретные источники и при обработке не нужен учет реальной формы диаграммы направленности антенны (ДН). В ИПА РАН главной задачей РВП является измерение параметров земной атмосферы для определения тропосферной задержки радиосигнала в интересах фундаментального координатно-временного обеспечения, а также позиционирования по сигналам ГНСС.

Основной целью нашей работы являлась демонстрация возможностей и перспектив нестандартного использования сверхмалых радиотелескопов типа РВП, а именно, для наблюдений Солнца. Как показано в нашей статье, использование РВП в наблюдениях Солнца на примере затмения 10.06.2021 г., в диапазоне линии водяного пара (1.35 см) на частотах 20.7 и 31.4 ГГц, наряду с получением обычной затменной кривой и измерением средней яркостной температуры Солнца, позволяет также поставить задачу исследования

влияния изменчивости поглощения в земной атмосфере на точность измерения как яркостной температуры Солнца, усредненной по всему диску, так и яркости отдельных деталей на нем.

2. ПРОЗРАЧНОСТЬ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ И РАДИОМЕТР ВОДЯНОГО ПАРА

Для основной части радиодиапазона, используемого в солнечных наблюдениях (сантиметровые — дециметровые волны), поглощение в атмосфере не велико. Но на коротковолновом краю (миллиметровые и субмиллиметровые волны) поглощение в атмосфере, а для малых антенн и ее излучение, оказывается решающим фактором (рис. 1а).

Основной вклад в поглощение вносят молекулы кислорода (O_2), паров воды (H_2O) и вода в жидкой фазе (дождь), концентрации которых в атмосфере Земли, как и вызываемое ими поглощение радиосигналов, переменны во времени, непредсказуемы и должны измеряться непосредственно во время наблюдения. Характерное время измерения для исследования Солнца во время затмения определяется полной длительностью затмения (до 3 ч).

Оценка параметров атмосферы в обсерваториях РСДБ комплекса “Квазар-КВО” проводится в режиме реального времени с помощью РВП — в настоящее время одним из высокоточных средств измерения радиояркостной температуры

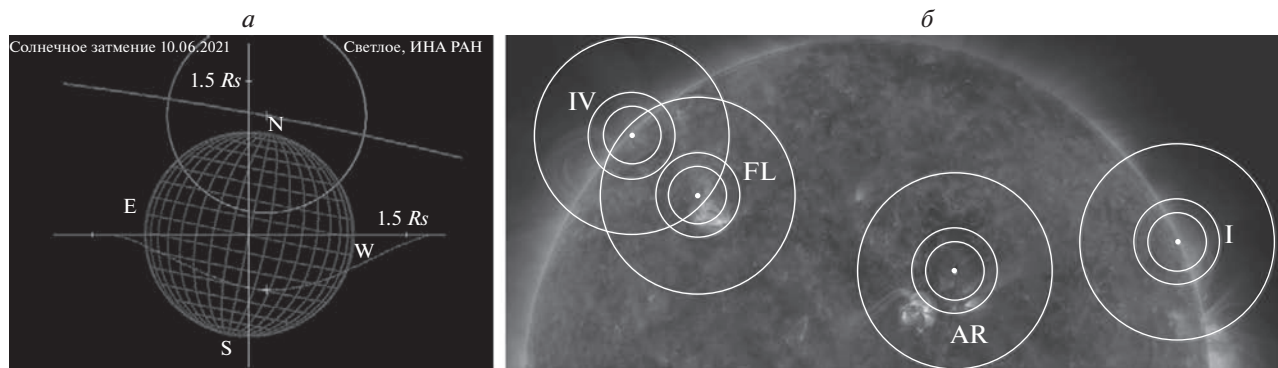


Рис. 2. (а) — расчетная траектория движения центра диска Луны (сплошная линия сверху) для наблюдения солнечного затмения в РАО “Светлое” и кривая покрытия площадей (пунктирная линия внизу). Крестиками отмечены положения центра Луны в момент максимальной фазы затмения. (б) — положение и размеры (ширина по уровню 0.5) диаграмм направленности радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 при наблюдении затмения 10.06.2021 г. Фоновое изображение — снимок Солнца в линии 171 Å (SDO/AIA) на момент максимальной фазы затмения.

излучения земной атмосферы [Серов и др., 2015]: диапазон измерений антенной температуры — от 6 до 313 К, чувствительность при усреднении по 1 с — 0.1 К. Наблюдения ведутся на двух частотах — 20.7 ± 0.25 ГГц (канал А) и 31.4 ± 0.5 ГГц (канал Б), расположенных с разных сторон от линии водяного пара (рис. 1а). РВП имеет азимутальную монтировку опорно-поворотного устройства, прием сигналов ведется с помощью двух независимых конических рупорно-линзовых антенн (РЛА) (см. рис. 1б). Радиометры типа РВП имеют возможность наведения антенной системы в заданную точку небесной полусферы и автоматического сопровождения источника радиоизлучения.

По результатам измерений на РВП яркостной температуры излучения атмосферы рассчитываются текущие значения оптической толщины атмосферы и интегрального коэффициента поглощения радиосигнала. Последнее используется для коррекции измеренной антенной температуры излучения космических источников за поглощение в атмосфере Земли.

Чувствительность РВП позволяет уверенно регистрировать излучение Солнца. Антенная температура Солнца в каналах РВП, как показывают измерения, лежит в пределах 50–70 К, в зависимости от величины поглощения радиосигнала в атмосфере. В период затмения 10.06.2021 г. в РАО “Светлое” антенная температура спокойного Солнца, скорректированная за поглощение в земной атмосфере, на частотах 20.7 и 31.4 ГГц, находилась на уровне 58.7 ± 2.5 К и 67.1 ± 2.5 К.

3. ОБСТОЯТЕЛЬСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗАТМЕНИЯ 10.06.2021 г.

Астрономические обстоятельства затмения 10.06.2021 г. были следующими: центральная по-

лоса затмения проходила значительно севернее европейской территории России (покрывалось Северное полушарие Солнца), в результате чего РАО “Зеленчукская” и “Уссурийская АО” оказались вне полосы затмения. Но для РАО “Светлое” (60.53° N, 29.78° E, Ленинградская обл.) и “Бадары” обстоятельства были неплохими — частная фаза затмения составила — 27% (см. рис. 2а) и 43% соответственно. В обеих обсерваториях были использованы крупные радиотелескопы РТ-13 и РТ-32, штатная аппаратура которых была специально отрегулирована для наблюдений Солнца. Для затмения 10.06.2021 г., учитывая слабую активность Солнца, был выбран режим, позволяющий выделять излучение деталей, для которых величина спектральной плотности потока составляла ~0.1% от полного потока Солнца, на фоне которого они наблюдались.

Методика наблюдений состояла в слежении радиотелескопом за избранным местом на диске Солнца во время его покрытия/открытия диском Луны. В программу наблюдений были включены 4 объекта — участок слабой активной области (AR), слабого флоккулярного поля (FL) и точек I и IV контактов (см. рис. 2б).

Антенная система РВП обс. “Светлое” была наведена на центр диска Солнца и осуществляла непрерывное слежение за ним. Поскольку в обс. “Бадары” РВП находился в штатном положении — антенна направлена в зенит, то наблюдения обс. “Бадары” здесь рассматриваться не будут. Параметры радиотелескопов, использованных в обс. “Светлое” для наблюдения затмения, приведены в табл. 1.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В результате наблюдений были получены затменные кривые на радиотелескопах РТ-13, РТ-32 и

Таблица 1. Параметры приемной аппаратуры и антенн радиотелескопов в РАО “Светлое”

телескоп	РТ-13 и РТ-32			РВП-4		
	диапазон частот, ГГц	длина волны, см	ширина ДН, угл. мин	приемные каналы	диапазон частот, ГГц	ширина ДН РЛА, град.
РТ-32	S: 2.15–2.5	13	14.6	А	20.7 ± 0.25	по азимуту: 6.0 ± 0.10 по высоте: 6.3 ± 0.08
	X: 8.18–9.08	3.5	3.94			
РТ-13	S: 2.2–2.4	13	34			
	X: 8.0–8.5	3.6	9	Б	31.4 ± 0.5	по азимуту: 5.45 ± 0.13 по высоте: 5.43 ± 0.05
	Ka (Ka2): 28–28.5	1.06	2.7			
	Ka (Ka3): 33.5–34.0	0.89	2.3			

РВП (см. рис. 3). Анализ спутниковых наблюдений GOES SXR показывает, что всплывшая активность Солнца в день затмения была небольшой (полный поток от Солнца в мягком рентгене в канале 1–8 Å не превышал 10^{-6} Вт м⁻²), и непосредственно в период затмения (9–12) UT полный поток еще уменьшился до $<2 \times 10^{-7}$ Вт м⁻². Поэтому при анализе кривой затмения активность Солнца можно не учитывать.

В целом, ход затменной кривой на РВП на частотах 20.7 и 31.4 ГГц хорошо аппроксимируется кривой покрытия площадей – величиной незакрытой площади Солнца в оптике (см. рис. 3, жирная черная кривая). Наличие на затменной кривой РВП значительных флуктуаций сигнала, составлявших в районе I и IV контактов величину ~30%, не позволяет исследовать неоднородности в распределении радиоизлучения по диску Солнца, в особенности на его краю, но не препятствует измерению средней яркостной температуры диска Солнца.

Происхождение наблюдаемых флуктуаций обусловлено влиянием атмосферы – в отдельные моменты времени на диск Солнца закрывали легкие облака. Приведенные на рис. 3 наблюдения на радиотелескопе РТ-13 на близких к РВП частотах показывают отсутствие сильных изменений в пределах их ДН, что подтверждает не солнечный характер регистрируемых РВП флуктуаций. При этом прослеживается определенная коррелированность РВП-флуктуаций с мелкими дефектами на записях РТ-13 (например, это наиболее заметно с 9:50 до 10:00, см. рис. 3), что позволяет интерпретировать их как результат влияния переменной облачности. Благодаря тому, что РВП позволяет измерять оптическую толщину атмосферы, его данные могут использоваться для анализа наблюдений на инструментах с более узкой диаграммой направленности (РТ-13 и РТ-32), где влияние облачности (амплитудные помехи) неот-

лично от физических изменений или неоднородности радиояркостности Солнца. В зависимости от структурированности облачности, амплитуда помехи при наблюдениях на крупных инструментах может быть на порядки меньше, чем на РВП (рис. 3), т.е. в задаче коррекции атмосферных помех большой точности от измерений на РВП не требуется.

5. ДИСКУССИЯ

Во время солнечного затмения 10.06.2021 г. в obs. “Светлое” на РВП на частотах 20.7 и 31.4 ГГц были зарегистрированы стандартные затменные кривые (изменение полного радиопотока от Солнца в ходе затмения). По своему характеру они хорошо совпадают с расчетной кривой покрытия площадей (площади открытой части Солнца, см. рис. 3), которую можно рассматривать как нижнюю, без учета влияния атмосферы, 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 характеристики РВП из таблицы); $\Omega_{\text{ист}}$ – 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 литератур-

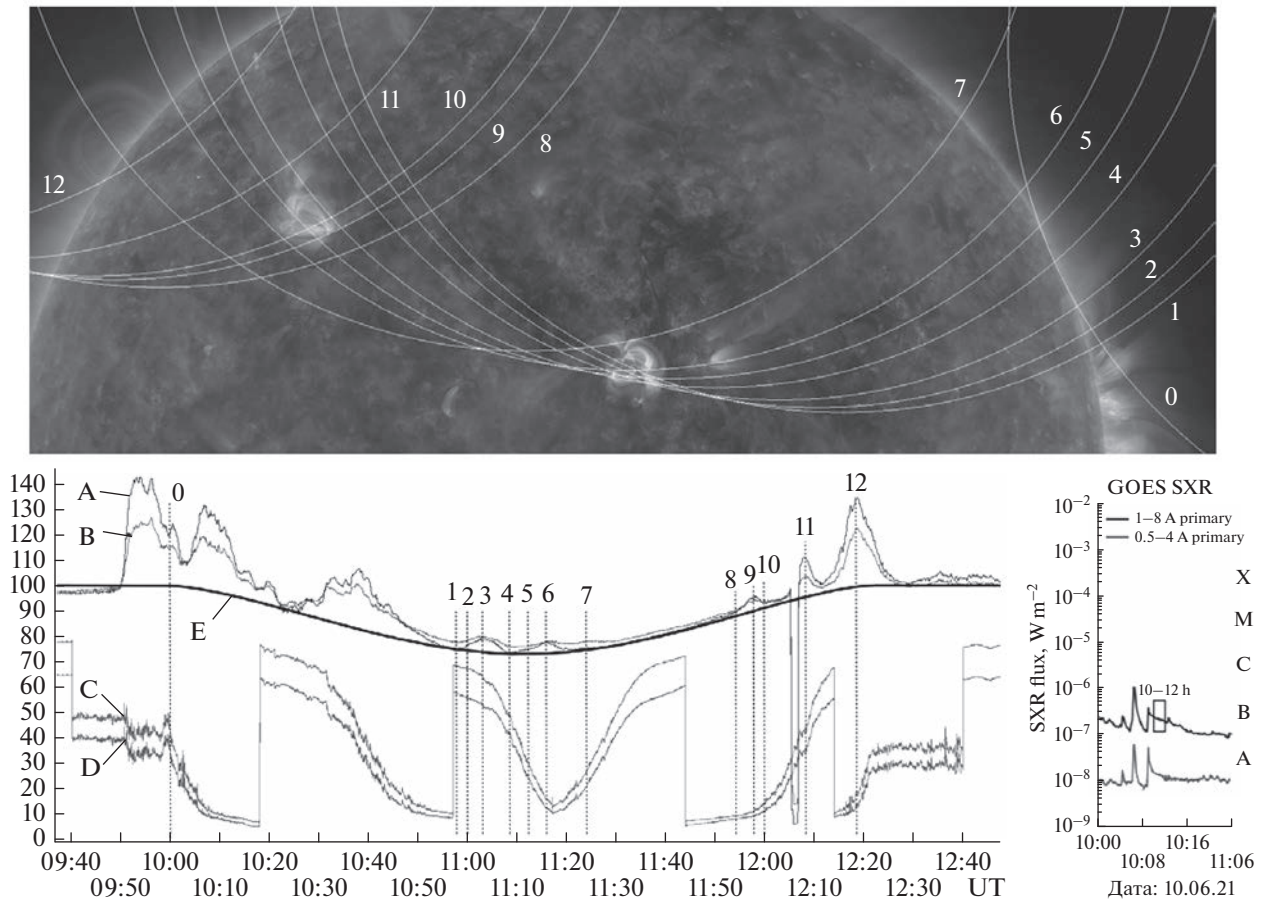


Рис. 3. Затменные кривые, полученные на РВП на частотах 20.7 ГГц (А) и 31.4 ГГц (В) и на радиотелескопе РТ-13 на частоте (28–28.5) ГГц (С и D — правая и левая поляризации). Кривые совмещены по времени и сопоставлены с данными GOES (правый график, данные сайта www.SolarMonitor.org). Е — кривая покрытия 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.

ным данным [Нагнибеда и Пиотрович, 1987; Лукичева, 2005] (см. рис. 4а).

Следует отметить, что, полученные нами оценки несколько завышены, поскольку при их вычислении в качестве размера диска Солнца использовался видимый радиус Солнца в оптическом диапазоне на день затмения ($R_{\text{rad}} = R_{\text{opt}} = 15.75$ угл. мин). В действительности по наблюдениям на крупных радиотелескопах распределение радиояркости по диску Солнца существенно неравномерное, с пространственными флуктуациями в рассматриваемом диапазоне длин волн до ± 500 К. При измерении в масштабе всего диска эти флуктуации усредняются, и в этом смысле можно употреблять термин **средняя яркостная температура**. Также на Солнце есть области, где яркостные температуры систематически существенно отличаются от средних значений — это прилибровая зона (так называемое уярчение к краю) и залибровая зона (хромосфера и корона). В целом, обе эти зоны имеют малые размеры и их вклад в инте-

гральный поток измеряется с большой неопределенностью, что вызывает ошибки при расчете средней T_B диска Солнца. Статистика наблюдений и модельные расчеты показывают [Nagnibeda et al., 2021, Fig. 6], что для волн РВП $\text{Rad} > R_{\text{opt}}$ не более чем на $15''$ (а скорее заметно меньше), и учет этого уменьшает яркостные температуры менее чем на 3% (270 и 240 К на частотах 20.7 и 31.4 ГГц соответственно).

В отличие от наших оценок (на частотах 20.7 и 31.4 ГГц — $T_B(20.7) = 9060 \pm 380$ К, $T_B(31.4) = 8050 \pm 300$ К) в последнее время появляются наблюдения, показывающие существенно более высокие значения яркостной температуры: 9950 ± 334 К на 22.235 ГГц, 10351 ± 370 К на 26.235 ГГц и 9217 ± 375 К на 30.000 ГГц [Lei et al., 2021], близкие к верхней границе разброса данных на рис. 4а. Наблюдаемый разброс может быть частично связан с всплывающей активностью Солнца и фазой солнечного цикла. Как видно по наблюдениям на более длинных волнах, величина

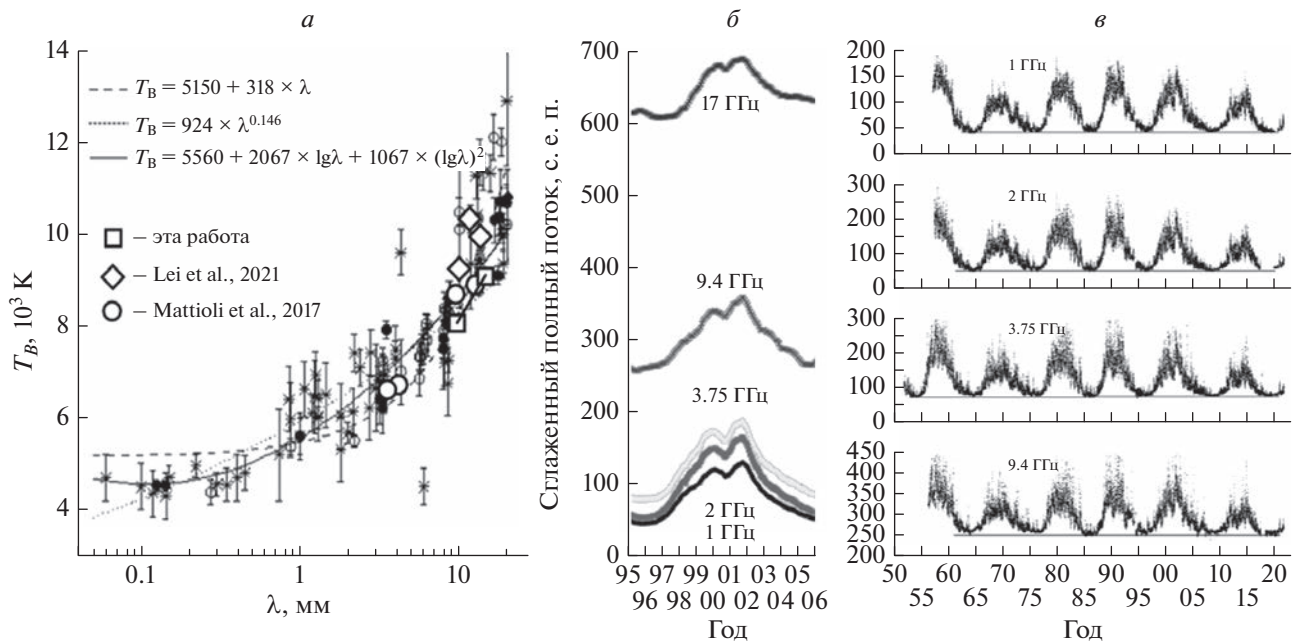


Рис. 4. (а) — измеренные значения яркостной температуры спокойного Солнца в миллиметровом диапазоне и их аппроксимации [Лукичева, 2005]. Соединенными квадратами на графике отмечены наши результаты, полученные на РВП в 2021 г., ромбиками и кружками — результаты, полученные на малых антеннах в последние годы [Lei et al., 2021; Mattioli et al., 2017]. (б) — результаты измерений полного потока Солнца на радиополяриметрах обс. Nobeyama (<https://solar.nro.nao.ac.jp/norg/>) в 23-м солнечном цикле на 1–17 ГГц. (в) — результаты измерений полного потока Солнца в диапазоне 1–9.4 ГГц в обсерваториях Тоюкава и Nobeyama с 50-х гг. прошлого века по текущее время (6 солнечных циклов). На каждой частоте горизонтальной линией проведен минимальный фоновый уровень.

полного потока представляет собой чрезвычайно сильно флуктуирующий сигнал (см. рис. 4в, где представлены все данные непрерывных наблюдений на радиополяриметрах обсерваторий Тоюкава и Nobeyama в течение 6 солнечных циклов (с начала 50-х гг. по настоящее время) на 4 частотах в диапазоне 1.0–9.4 ГГц). Даже при месячном усреднении графики потоков [Shibasaki et al., 2011, Fig. 16] остаются сильно зашумленными. Величина отдельных выбросов в максимумах циклов достигает до ± 25 с.е.п. на всех частотах. При этом, что важно, **величина полного потока в минимумах солнечных циклов для частот в диапазоне 1.0–9.4 ГГц практически не зависит от номера цикла** (см. рис. 4в). Для более высоких частот регулярные данные аналогичного качества, к сожалению, отсутствуют.

Для оценки величины влияния активности Солнца на регистрируемый полный поток рассмотрим временную динамику его спектра на примере сглаженных за год данных для 23-го цикла (рис. 4б), выбранного как среднего по характеристикам представителя из имеющихся 6 циклов. Из рисунка видно, что приращение потока (F) от минимума к максимуму солнечного цикла ($F_{\max} - F_{\min}$) на всех волнах примерно одинаково, что соответствует модели переменного, оптически тонкого источника (корона и часть верхней хромосферы),

расположенного над источником постоянной интенсивности.

Тогда относительное приращение полного потока (и соответственно яркостной температуры) по формуле $Ampl = (F_{\max} - F_{\min}) / F_{\min}$ для 23-го цикла дает: $Ampl(1 \text{ ГГц}) = 225\%$, $Ampl(2 \text{ ГГц}) = 185\%$, $Ampl(3.75 \text{ ГГц}) = 135\%$, $Ampl(9.4 \text{ ГГц}) = 45\%$, $Ampl(17 \text{ ГГц}) = 10\%$. Экстраполяция этих значений на рабочие частоты РВП дает оценки $Ampl(20.7 \text{ ГГц}) = 5\%$, $Ampl(31.4 \text{ ГГц}) = 0.7\%$ или в яркостных температурах 450 и 60 К соответственно. Это значительно меньше разброса измерений на соответствующих частотах, приведенных на рис. 4а (~ 1000 К).

Более того, имеющиеся наблюдательные данные в миллиметровом диапазоне длин волн часто противоречивы и не показывают явного доминирующего влияния активности Солнца на измеренную среднюю яркостную температуру Солнца. Например, из последних наблюдений, результаты [Mattioli et al., 2017] (см. рис. 4а) близки к средним значениям, при том, что наблюдения были выполнены в мае–октябре 2015 г., когда Солнце находилось в середине спада активности (среднее количество солнечных пятен — 64–76). Тогда как наблюдения [Lei et al., 2021] дают большие значения яркостной температуры, хотя наблюдения проводились в минимуме солнечной

активности (в июне 2020 г., среднее число пятен — 5.8). Наши же наблюдения, выполненные в начале роста активности Солнца (июнь 2021 г., среднее число пятен — 25.0), дают минимальные значения. Причины этого пока не ясны, возможно, имеются дефекты в использованных методиках измерений. У использованного нами метода (затмение) имеется определенное преимущество, состоящее в том, что в процессе самого измерения излучение источника (Солнца) изменяется известным предсказуемым образом, что позволяет отделить эту часть излучения, от посторонних излучений, одновременно регистрируемых прибором.

То, что наши измерения яркостной температуры находятся у нижней границы наблюдательных данных (см. рис. 4а), также может служить косвенным свидетельством правильности наших результатов, поскольку, хотя измерения производились не строго в минимуме солнечного цикла, но растущий уровень активности по данным радиополяриметра Nobeyama был еще мал: минимальный поток на 17 ГГц был в июле 2019 г. $F_{\min} = 601$ с.е.п., а 9.06.2021 г. $F = 623$ с.е.п., т.е. превышение потока на день затмения составило ~4%, и экстраполяция его на 20.7 ГГц дает возможное превышение из-за активности Солнца ~2% или ~200 К. На 31.4 ГГц поправки на активность значительно меньше. Поэтому полученные в день затмения 10.06.2021 г. результаты могут рассматриваться как полученные в период минимума соответствующего солнечного цикла.

Опыт наблюдений солнечных затмений также свидетельствует, что влияние погодных условий на качество получаемых результатов изучено еще недостаточно. Так, при наблюдении затмения 1962 г. в Мали при совершенно безоблачном небе в момент полной фазы вокруг Солнца образовалось полупрозрачное облачко, из-за которого не удалось провести наблюдения в оптическом диапазоне, а на микроволнах они оказались среднего качества [Петерова и др., 1963]. Другой пример, затмение 1976 г., при наблюдении которого в Архызе в условиях густого тумана, была получена затменная кривая (волна 4.0 см) — одна из лучших (по соотношению сигнал/шум) в истории наблюдений затмений на микроволнах [Boldyrev et al., 1978]. Этот опыт диктует целесообразность продолжения исследований влияния поглощения в атмосфере на наблюдения Солнца, в том числе и с использованием наблюдений на РВП, который может служить одновременно и как прибор контроля за состоянием атмосферы (возможно с функцией независимого калибратора), и как самостоятельный наблюдательный инструмент. Ближайшая возможность таких наблюдений представится в октябре 2022 г.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По результатам наблюдения солнечного затмения на РВП 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.

2. 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.

3. Показана целесообразность использования наблюдений на РВП как отдельно, так и в сочетании с параллельными наблюдениями на крупных радиотелескопах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анушкинский Г.П., Нагнибеда В.Г. Структура локальных источников группы пятен № 57 по результатам наблюдения солнечного затмения 20 мая 1966 г. / Радиоастрономические наблюдения солнечного затмения 20 мая 1966 г. Ред. Гельфрейх Г.Б., Лившиц М.А. М.: Наука. С. 33–38. 1972.
- Гельфрейх Г.Б., Дравских А.Ф., Старшинов А.А., Лившиц М.А. Структура источников радиоизлучения, связанных с биполярными группами солнечных пятен / Радиоастрономические наблюдения солнечного затмения 20 мая 1966 г. Ред. Гельфрейх Г.Б., Лившиц М.А. М.: Наука. С. 38–41. 1972.
- Лукичева М.А. Структура и динамика солнечной хромосферы на основе наблюдений в миллиметровом диапазоне. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. СПб.: изд-во ЛГУ. 19 с. 2005.
- Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. Радиоизлучение Солнца в миллиметровом диапазоне волн // Тр. Астр. Obs. ЛГУ. Т. 41. С. 5–80. 1987.
- Петерова Н.Г., Молчанов А.П., Нагнибеда В.Г. Наблюдение кольцеобразного солнечного затмения 31 июля 1962 г. на волне 4.5 см // Бюллетень Солнечные Данные. М.: Академия наук СССР. № 8. С. 68–71. 1963.
- Серов Е., Кошелев М., Вилков И., Одинова Т., Паршин В., Третьяков М. Исследование спектра поглощения микроволн атмосферным водяным паром для задач ди-

- станционного зондирования окружающей среды // ИКИ РАН. Шестая международная Школа-семинар: “Спутниковые методы и системы исследования Земли”. 02.03–06.03.2015, г. Таруса. http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2015/19.pdf
- Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н., Кольцов Н.Е., Коркин Э.И., Малкин З.М., Рахимов И.А., Сальников А.И., Смоленцев С.Г. Радиоинтерферометрическая сеть “Квазар-КВО” – базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Тр. ИПА РАН. Вып. 13. С. 104–138. 2005.
- Финкельштейн А.М., Рахимов И.А., Дьяков А.А., Коржавин А.Н., Топчило Н.А., Свешников М.Л., Петерова Н.Г. Наблюдения солнечного затмения 04.01.2011 г. на двух радиотелескопах РТ–32 (Светлое и Зеленчукская): первые результаты // Тр. ИПА РАН. СПб.: Наука. Вып. 25. С. 154–159. 2012.
- Arsaev I.E., Bykov V.Yu., Il'in G.N., Yurchuk E.F. Water Vapor Radiometer: Measuring instrument of atmospheric brightness temperature // Meas. Tech. V. 60. Iss. 5. P. 497–504. 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-017-1224-1>
- Boldyrev S.I., Ipatova I.A., Ipatov A.V., Peterova N.G. Fine structure of a local solar radio source // Sov. Astron. Lett. V. 4. P. 251–253. 1978.
- Lei L., Wang Z., Ma Y., Zhu L., Qin J., Chen R., Lu J. Measurement of Solar Absolute Brightness Temperature Using a Ground-Based Multichannel Microwave Radiometer // Remote Sens. V. 13. 2968. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13152968>
- Mattioli V., Milani L., Magde K.M., Brost G.A., Marzano F.S. Retrieval of Sun Brightness Temperature and Precipitating Cloud Extinction Using Ground-Based Sun-Tracking Microwave Radiometry // IEEE J. Sel. Top. Appl. V. 10. Iss. 7. P. 3134–3147. 2017. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2633439>
- Nagnibeda V.G., Topchilo N.A., Loukitcheva M.A., Rakhimov I.A. Features of radio-brightness distribution over the Solar Disk at Millimeter Waves: Models and Observations // Geomagn. Aeronomy. V. 61. № 8. P. 1150–1158. 2021. <https://doi.org/10.1134/S001679322108017X>
- Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S. Radio emission of the quiet sun and active regions (invited review) // Solar Phys. V. 273. № 2. P. 309–337. 2011.