

Солнечное затмение 21.06.2020 г. по наблюдениям на радиотелескопах ИПА РАН (первые результаты)

© Д. В. Иванов¹, И. А. Рахимов¹, А. А. Дьяков¹, В. Г. Олифинов¹, Д. В. Ерофеев¹, Н. А. Топчило², Н. Г. Петерова³, А. В. Ипатов¹, Т. С. Андреева¹, Г. Н. Ильин¹, Е. Ю. Хвостов¹

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

³САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Солнечное затмение 21.06.2020 г. (фаза 0.17–0.24) — это седьмой случай наблюдений затмений Солнца с помощью полноповоротных радиотелескопов РТ-32, РТ-13 и РТ-2, расположенных в обсерваториях на Северном Кавказе («Зеленчукская»), в Бурятии («Бадарь») и Приморском крае (Уссурийская астрофизическая обсерватория), находящихся в ведении ИПА РАН. Задачи наблюдений определялись астрономическими обстоятельствами — Солнце находилось в стадии глубочайшего минимума, что в отличие от предыдущих случаев выдвинуло на первый план исследование слабых деталей структуры изображения Солнца, таких как распределение радиояркости вблизи лимба, корональные дыры, радиогрануляция, до сих пор недостаточно изученные.

Метод наблюдений считается наилучшим благодаря применению квазиузлового способа регистрации сигнала путем использования радиотелескопов с достаточно высоким пространственным разрешением (несколько угл. мин.), ограничивающим вклад спокойного Солнца. Именно с помощью РТ-32 впервые был достигнут теоретический предел эффективного углового разрешения затменных наблюдений — (1–3)'' на микроволнах. Наблюдения солнечного затмения 21.06.2020 г. на РТ-13 и РТ-32 выполнялись на волнах 1.0 см, 3.5 см, 6.2 см и 13 см с анализом круговой поляризации, на РТ-2 — на волне 10.7 см в интенсивности.

Приведены оригинальные записи и результаты первичной обработки, а также предварительного отождествления отдельных деталей структуры источников микроволнового излучения путем сопоставления с наблюдениями Солнца в других диапазонах (УФ и X-ray). Анализ наблюдений участков спокойного Солнца показал, что угловые размеры отдельных деталей радиогрануляции не превосходят 10'', и отмечается высокая степень корреляции между флуктуациями на короткой (3.5 см) и длинной (13 см) волнах. Сделан вывод, что излучение наиболее ярких деталей радиогрануляции генерируется достаточно высоко в короне на расстоянии, превышающем 10 тыс. км от фотосферы. Обработка наблюдений при наведении на область I и IV контактов позволяет заключить, что яркость короны значительно уменьшилась по сравнению с ранее получаемыми значениями. Однако это касается яркости активной короны — радиопоток спокойного Солнца, наблюдаемый в период минимума цикла (начиная с 19-го до 25-го) остается неизменным в широком диапазоне частот (1–9.4 ГГц).

Ключевые слова: радиотелескоп, солнечное затмение, затменная кривая, радиоизображение, активная область, корона, радиоизлучение.

Контакты для связи: Рахимов Исмаил Ахмедович (rahimov@iaaras.ru), Ильин Геннадий Николаевич (igen@iaaras.ru).

Для цитирования: Иванов Д. В., Рахимов И. А., Дьяков А. А., Олифинов В. Г., Ерофеев Д. В., Топчило Н. А., Петерова Н. Г., Ипатов А. В., Андреева Т. С., Ильин Г. Н., Хвостов Е. Ю. Солнечное затмение 21.06.2020 г. по наблюдениям на радиотелескопах ИПА РАН (первые результаты) // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 22–31.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.56.22-31>

Solar Eclipse on June 21, 2020 According to Observations with IAA RAS Radio Telescopes (First Results)

D. V. Ivanov¹, I. A. Rakhimov¹, A. A. Dyakov¹, V. G. Olifirov¹, D. V. Erofeev¹, N. A. Topchilo², N. G. Peterova³, A. V. Ipatov¹, T. S. Andreeva¹, G. N. Il'in¹, E. Yu. Khvostov¹

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The solar eclipse on June 21, 2020 (phase 0.17–0.24) is the seventh case of observations of solar eclipses using the full-circle full-steering radio telescopes RT-32, RT-13 and RT-2 located at “Zelenchukskaya” observatory in the North

Caucasus, observatory "Badary" in Buryatia and Ussurijskaya Astrophysical Observatory (UAO) in the Primorsky Territory, which are under the jurisdiction of the IAA RAS. Observation tasks were determined by astronomical circumstances — the Sun was in the stage of the deepest minimum, which, in contrast to previous cases, highlighted the study of faint details of the Sun's image structure, such as the radio brightness distribution near the limb, coronal holes, radio granulation, which are still insufficiently studied.

The observation method is considered to be the best due to the application of a quasi-zero method of signal registration by using radio telescopes with a sufficiently high spatial resolution (2–4)' at high frequencies (several angular minutes), which limits the contribution of the quiet Sun. The theoretical limit of the effective angular resolution of eclipsing observations — (1–3)" at microwaves was first reached using the RT-32. Observations of the solar eclipse on June 21, 2020 at RT-13 and RT-32 were carried out at 1.0 cm, 3.5 cm, 6.2 cm, and 13 cm with circular polarization analysis, at RT-2 at 10.7 cm in intensity.

Original records and results of primary processing are presented, as well as preliminary identification of individual details of the structure of microwave radiation sources by comparison with observations of the Sun in other ranges (UV and X-ray). The analysis of observations of the quiet Sun areas showed that the angular sizes of individual radio granulation details do not exceed 10 arcsecond, and there is a high degree of correlation between fluctuations at short (3.5 cm) and long (13 cm) wavelengths. The individual radio granulation radiation is generated rather high in the corona at a distance exceeding 10 thousand km from the photosphere. Processing of observations when aiming at contact regions I and IV allows us to conclude that the brightness of the corona has significantly decreased in comparison with the previously obtained values. However, this concerns the brightness of the active corona — the quiet Sun radio flux observed during the minimum cycle (from the 19th to the 25th) remains unchanged in a wide frequency range (1–9.4 GHz).

Keywords: radio telescope, solar eclipse, eclipse curve, radio image, active region, corona, radio emission.

Contacts: Ismail A. Rakhimov (rahimov@iaaras.ru), Gennady N. Il'in (igen@iaaras.ru).

For citation: Ivanov D. V., Rakhimov I. A., Dyakov A. A., Olifirov V. G., Erofeev D. V., Topchilo N. A., Peterova N. G., Ipatov A. V., Andreeva T. S., Il'in G. N., Khvostov E. Yu. Solar eclipse on June 21, 2020 according to observations with IAA RAS radio telescopes (first results) // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 56. P. 22–31.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.22-31>

Введение

Наблюдения солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН были начаты в 1999 г., и затмение 21.06.2020 г. — это седьмой случай (11.08.1999 г., 03.05.2003 г., 29.03.2006 г., 01.08.2008 г., 04.01.2011 г., 20.03.2015 г.) [1–4]. Впервые крупный полноповоротный радиотелескоп был применен для наблюдений солнечного затмения 1966 г. [5, 6], послуживших началом развития особого метода исследований радиоизлучения Солнца — «затменного». Он не утратил своего значения и в наши дни, прежде всего благодаря высокой точности координатных измерений, определяемой положением лунного лимба, которое можно рассчитать аналитически. Кроме того, использование крупных зеркал позволяет реализовать наилучший вариант квазиулевого способа регистрации сигнала, ограничивая вклад спокойного Солнца при исследовании слабых деталей структуры. К числу таких инструментов относятся и радиотелескопы ИПА РАН. Именно с помощью RT-32 впервые был достигнут теоретический предел эффективного углового разрешения затменных наблюдений $\sim (1-3)''$ на микроволнах [3].

Солнечное затмение 21.06.2020 г. на территории России было частным, и в его наблюдении смогли принять участие три (из четырех) радиоастрономические обсерватории (РАО), входящие в состав ИПА РАН: «Зеленчукская» (Северный Кав-

каз), «Бадарь» (Бурятия) и Уссурийская астрофизическая обсерватория (УАО) (Приморский край), фаза в этих пунктах составляла 0.175, 0.238 и 0.243 соответственно. РАО «Светлое» находилась севернее полосы затмения. Впервые наблюдения Солнца выполнялись не только на радиотелескопах RT-32, но и на недавно введенных в эксплуатацию радиотелескопах RT-13, что значительно увеличило спектральное разрешение наблюдений и позволило оценить спектрально-поляризационные характеристики и структуру микроволнового излучения, как для «спокойного» Солнца, так и отдельных деталей на его диске. Задачи наблюдений определялись астрономическими обстоятельствами — Солнце находилось в стадии глубочайшего минимума, что в отличие от предыдущих случаев выдвинуло на первый план новые цели. Если ранее исследовалась в основном тонкая структура ярких источников над активными областями, то теперь в задачи наблюдений можно было включить более слабые объекты и эффекты, такие как распределение радиояркости вблизи лимба, корональные дыры, радиогрануляция, до сих пор недостаточно изученные. На основе радиоданных диагностируются физические параметры корональной плазмы, разрабатываются модели ее структуры и проверяется правильность представлений о физике процессов, протекающих в атмосфере Солнца от хромосферы до короны на высоте ~ 100 тыс. км.

Обстоятельства затмения 21.06.2020 г. и метод наблюдений

Полоса солнечного затмения 21.06.2020 г. проходила южнее европейской территории России — покрывалось южное полушарие Солнца. В РАО «Зеленчукская» и «Бадарь» наблюдалась его частная фаза, причем наилучшие условия реализовались для РАО «Бадарь», где затмение происходило вблизи момента местной кульминации Солнца и были расположены крупные зеркала радиотелескопов РТ-13 и РТ-32.

В наблюдениях затмения использовалась штатная аппаратура РТ-13 и РТ-32, но специально отрегулированная для наблюдений Солнца [3]. В случае затмения 21.06.2020 г., учитывая слабую активность Солнца, был выбран режим, позволяющий выделить излучение детали, для которой величина спектральной плотности потока излучения составляла $\sim 0.1\%$ от полного потока Солнца, на фоне которого она наблюдалась.

Методика наблюдений состояла в слежении радиотелескопом за избранным местом на диске Солнца во время его покрытия/открытия диском Луны (более полное описание методики наблюдений см. [3]). Положения и моменты наведения рассчитывались заранее на основе данных астрономического ежегодника (<http://iaaras.ru/media/data/ae2020/20200621soa.txt>), программы А. Н. Коржавина и регулярных многоволновых наблюдений Солнца, в частности, на радиотелескопах РАТАН-600, ССРТ, NoRH и космической обсерватории SDO. Для затмения 21.06.2020 г. в программу наблюдений были включены 4 объекта —

участок «спокойного» Солнца (QS), точки I и IV контактов (I и IV) и южная корональная дыра (CH), на рис. 1 дана схема их расположения на диске Солнца.

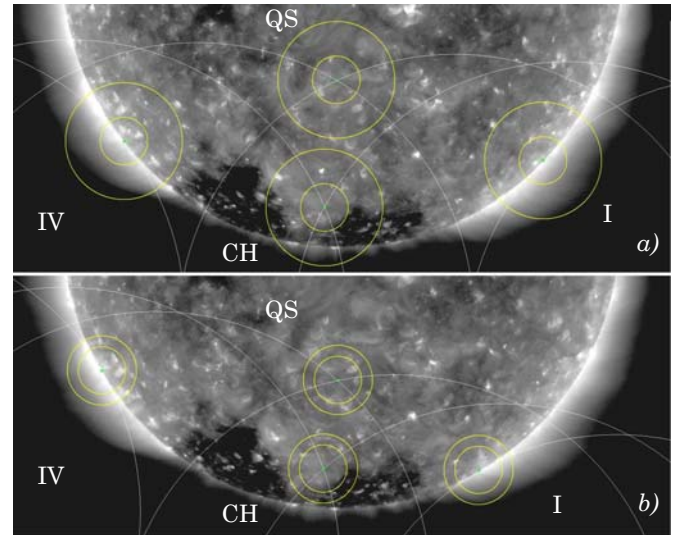


Рис. 1. Схема расположения точек наведения радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 (в РАО «Бадарь» (1a) и РАО «Зеленчукская» (1b)), наложенные на УФ-изображения Солнца на волне 193\AA (SDO), для средних моментов наблюдения. Дугами показано положение лимба Луны в момент прохождения через точку наведения, окружностями — размеры диаграмм направленности на волнах 1 см (РТ-13) и 6.2 см (РТ-32) (для РАО «Бадарь») и 1 см (РТ-13) и 3.5 см (РТ-32) (РАО «Зеленчукская»). Полный набор характеристик телескопов и приемной аппаратуры представлен в таблице

Таблица

Параметры использованной приемной аппаратуры и радиотелескопов ИПА РАН

Телескоп	РАО «Зеленчукская»			РАО «Бадарь»			Уссурийская АО					
	Диапазон частот, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, угл. мин.	Диапазон частот, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, угл. мин.	Частота, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, градус			
РТ-32	S: 2.15–2.5	13	14.6	C: 4.6–5.1	6.2	6.6	2.804	10.7	3.0			
	X: 8.18–9.08	3.5	3.94									
РТ-13	S: 2.2–2.4	13	34	S: 2.2–2.4	13	34						
	X: 8.0–8.5	3.6	9	X: 8.0–8.5	3.6	9						
	Ka (Ka2): 28–28.5	1.06	2.7	Ka (Ka2): 28–28.5	1.06	2.7						
	Ka (Ka3): 33.5–34.0	0.89	2.3	Ka (Ka3): 33.5–34.0	0.89	2.3						
РТ-2												

Наблюдения и предварительная обработка

В результате наблюдений на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 [7] на всех волнах получены затменные кривые — всего 22 независимых кривых в правой (R) и левой (L) круговых поляризациях (0.89 см, 1.06 см, 3.5 см, 6.2 см и 13 см). Исходный (не калиброванный) вид кривых иллюстрирует рис. 2. Здесь же приведена затменная кривая по наблюдениям на радиотелескопе РТ-2 в Уссурийске (10.7 см, I).

Для получения количественных характеристик источников излучения применялась методика обработки, состоящая из следующих процедур:

1) приведения кривых, полученных в параметрах R и L, к одному масштабу. Процедура выполнялась способом выравнивания усиления по участкам «спокойного» Солнца, излучение которого слабо поляризовано;

2) вычисления производной с целью получения распределения яркости и ее осреднения с по-

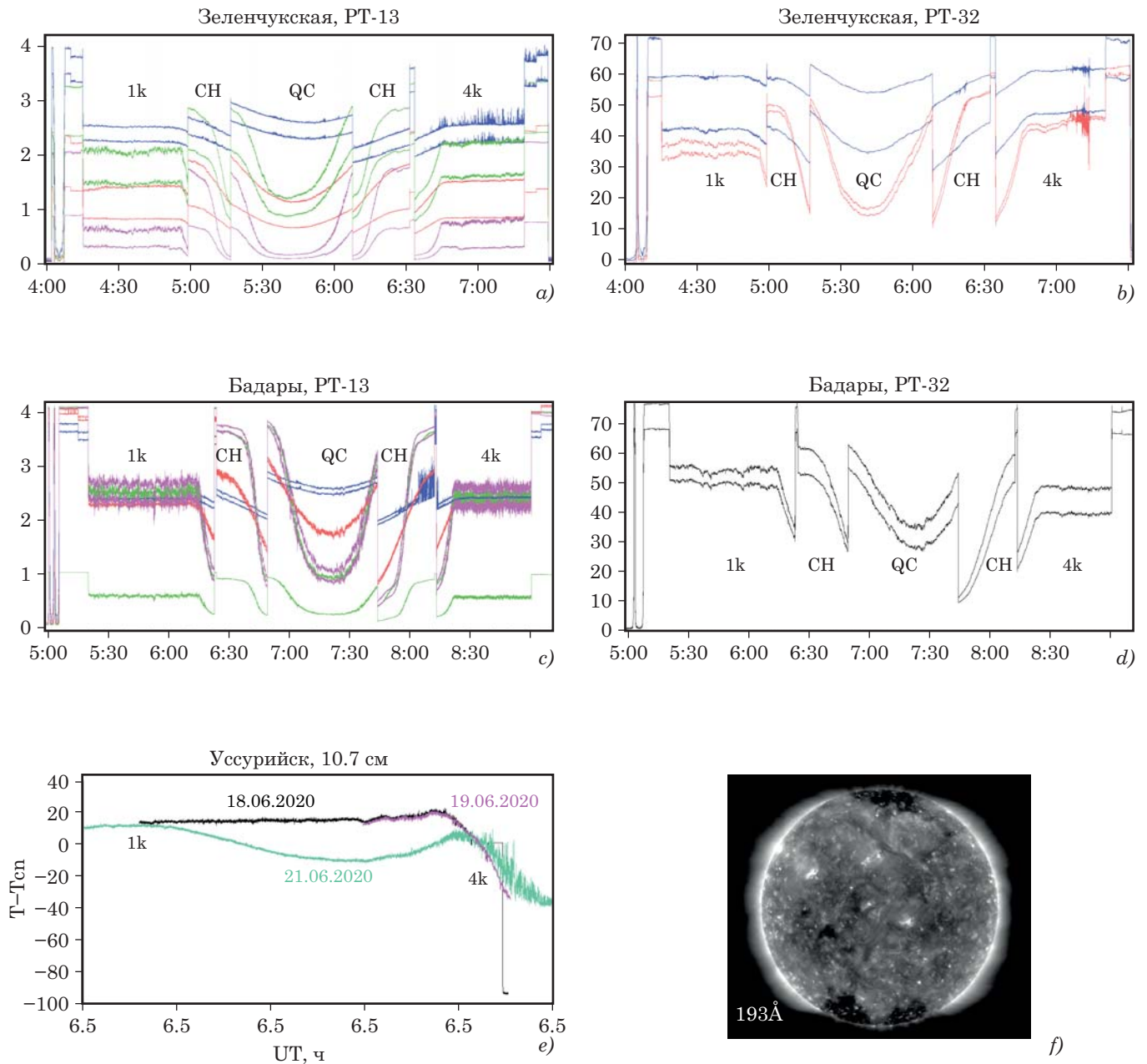


Рис. 2. Оригинальные затменные кривые, полученные в разных обсерваториях в период покрытия и открытия точек I и IV контактов (1k и 4k), участка «спокойного Солнца» (QS) и корональной дыры (CH). Шкала ординат — в условных единицах, по оси абсцисс — всемирное время (UT). Для наблюдений в РАО «Зеленчукская» и РАО «Бадары» цвет кривых на графиках соответствует длине волны наблюдения: синий — 13 см, черный — 6.2 см, красный — 3.5 см, зеленый — 1.06 см, розовый — 0.89 см. Для Уссурийской АО кроме затменной кривой приведены записи слежения за Солнцем в ближайшие дни. Справа-внизу приведено изображение Солнца на день затмения в линии 193 Å (SDO/AIA)

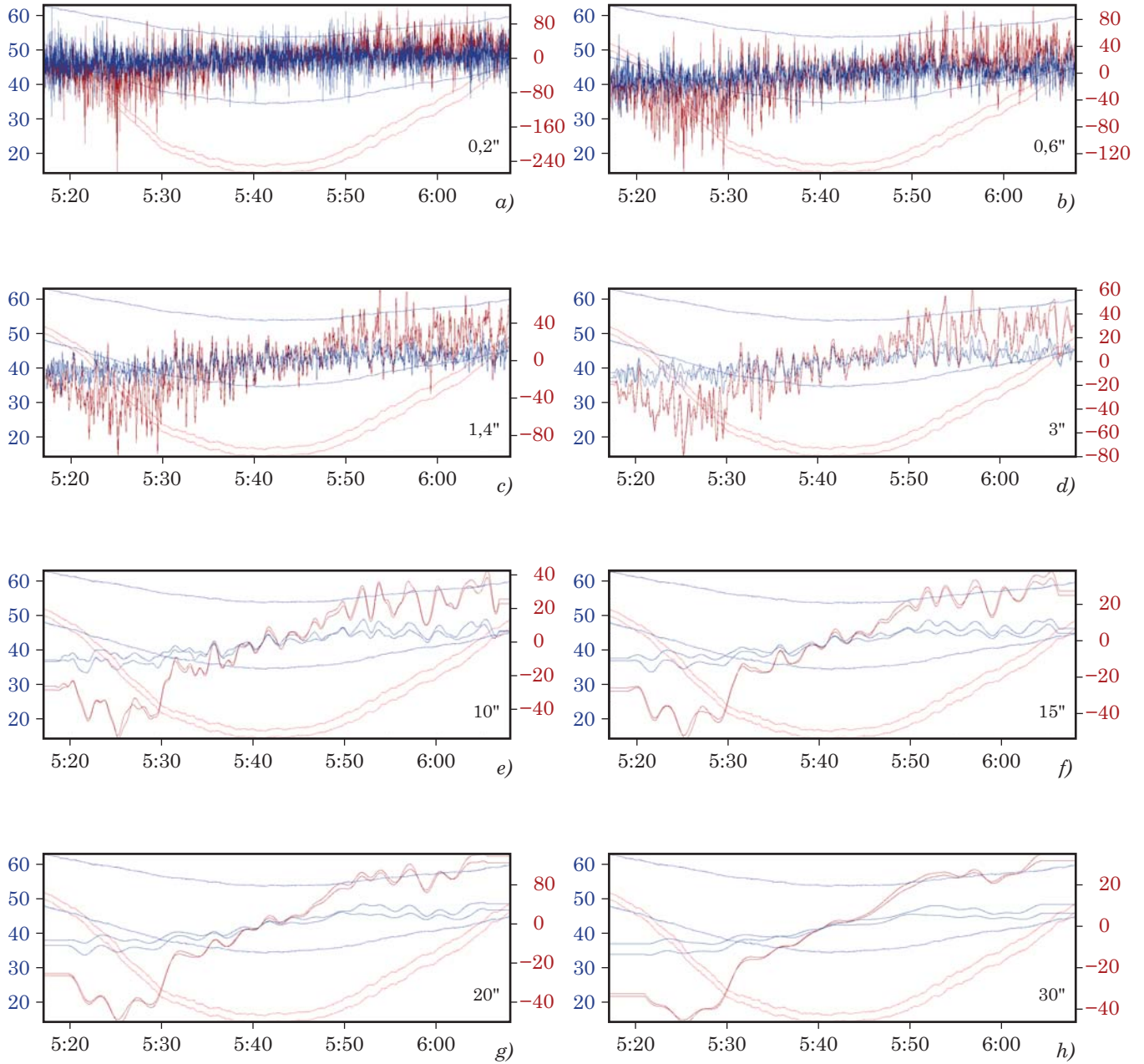


Рис. 3. Иллюстрация влияния сглаживания на одномерное распределение яркости и выбор эффективного разрешения наблюдений на примере обработки участка QS. На каждом кадре указан размер сглаживающей гауссианы

мощью аппаратной функции (гауссиана), меняя размер которой можно выбрать оптимальную (рис. 3). Оптимальная функция определяет эффективное разрешение, достигнутое в затменных наблюдениях;

3) выделение активных областей на фоне «спокойного» Солнца, в качестве которого может служить кривая покрытия площадей;

4) отождествление отдельных деталей распределения радиояркости путем сопоставления с фотогелиограммой Солнца и его изображением в других диапазонах электромагнитного излучения. Последняя процедура требует точного расчета положений лунного лимба в моменты контакта с источником радиоизлучения и внесения поправок, учитывающих разницу во времени получения сравниваемых изображений.

Первые результаты обработки наблюдений затмения 21.06.2020 г. показаны на рис. 3. Видно, что в данном случае наблюдений участка QS размер эффективного разрешения равен $8''$. Согласно [5, 6], на основе предварительно полученного распределения яркости (рис. 4), можно заключить, что характер регистрируемого сигнала позволяет интерпретировать его как проявление радиогрануляции. Радиогрануляция регулярно наблюдается на радиотелескопе РАТАН-600. Затменные наблюдения, полученные с более высоким угловым разрешением, особенно на длинных волнах (13 см), дают возможность существенно уточнить характеристики этой компоненты солнечного излучения. Измерения показали, что угловые размеры отдельных деталей в излучении составляют

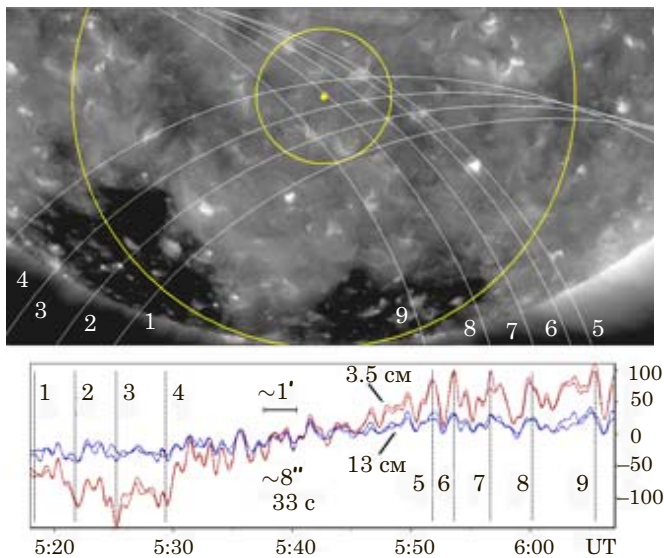


Рис. 4. Распределение яркости излучения в период покрытия/открытия участка спокойного Солнца по наблюдениям в РАО «Зеленчукская» на РТ-32 на волнах 3.5 см и 13 см в R и L поляризациях, сглаженное гауссианой с шириной $\sim 8''$. Фоновый рисунок: изображение Солнца в линии 193 \AA (SDO/AIA)

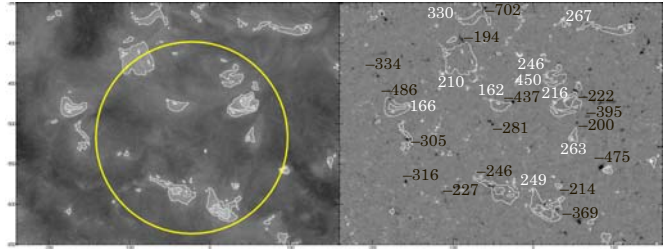


Рис. 5. Сопоставление УФ-изображения участка спокойного Солнца (QS) с продольной компонентой магнитного поля (SDO/HMI) в пределах диаграммы направленности радиотелескопа РТ-32 на 3.5 см, показанной в виде окружности ($\theta_{0.5} = 3.94'$). Указано максимальное значение магнитной индукции в Гс и его знак (\pm соответственно N/S –полярности)

менее $10''$, и отмечается высокая степень корреляции между флуктуациями на короткой (3.5 см) и длинной (13 см) волнах. Вклад единичной детали составляет менее 0.1% по отношению к фоновому излучению всего диска (~ 250 с. е. п. на волне 3.5 см). В целом можно сделать вывод, что излучение наиболее ярких деталей радиогрануляции генерируется в короне, однако при сопоставлении с наблюдениями в УФ и X-ray диапазонах пока не удалось сделать их более точное отождествление. Основным препятствием является наличие в покрываемой области большого количества мелко-масштабных структур с близкими пространственно-яркостными характеристиками. Для оценки природы излучения радиогрануляции полезно сопоставить распределение яркости с фотосферным магнитным полем (МП), вид которого представлен на рис. 5.

Магнитная активность Солнца в рассматриваемый период была низкой. Почти всю поверхность Солнца занимали слабые фоновые магнитные поля с максимальными значениями магнитной индукции (МИ), не превышающими 10–20 Гс. Только в отдельных, крайне немногочисленных точках диска величина МИ достигала 600–700 Гс. Более часто встречаются мелко-масштабные области (~ 20 – $30''$) усиления МИ в диапазоне (200–500) Гс, предположительно генетически связанные с наблюдаемым уярчением излучения на волне 193 \AA — с петлями — их основаниями и вершиной.

Анализ наблюдений приполярной корональной дыры показал, что эта область ничем не отличается от области спокойного Солнца и характеризуется аналогичной радиогрануляцией.

Дискуссия

Участок «Спокойное Солнце»

История исследований радиогрануляции восходит к периоду 1974–1975 гг., одновременно начатых в России и за рубежом [8]. Термин «радиогрануляция» не совсем удачен, как стало ясно почти сразу, скорее всего он отражает структуру

переходной области короны, подобную спиккулярной структуре хромосферы.

Для обозначения мелкомасштабных структур различной природы теперь принят термин SSS — «small-scale structures» [9]. К этому классу принадлежит и радиогрануляция, которую предлагается называть «small-scale quite sun structures» (QSSS). С самого начала наблюдения SSS проводились в широком диапазоне длин волн от 1.4 мм до 10 см с использованием различных радиотелескопов, на РАТАН-600 они ведутся регулярно с 2005 г. с высоким спектральным разрешением $\sim 1\%$. Согласно [9], QSSS-излучение генерируется в нижней части переходной области. В предположении о тормозной природе этого излучения, по наблюдениям на волне 2 см была сделана оценка степени поляризации и величины магнитного поля в нескольких точках на скане Солнца, оказавшиеся в пределах (1.5–8.5) % и (40–230) Гс соответственно.

Наблюдения затмения 21.06.2020 г. показали, что фотосферное МП в QS-области очень слабое. Тем более оно мало и выше в переходной области.

Участки I и IV контактов

Кроме исследования с высоким угловым разрешением отдельных локальных структурных деталей на диске Солнца, затмение традиционно используется также для исследования глобальных характеристик диска — распределения радиояркости в прилиббовой зоне (урчание к краю диска Солнца) и размеров диска (радиорadius Солнца). Оба этих параметра определяются высотным распределением физических параметров в атмосфере Солнца, которые можно эффективно исследовать при наблюдении затмения в период I и IV контактов. В случае затмения 21.06.2020 г. в период I контакта наблюдается покрытие низкоширотной прилиббовой области в SW-секторе солнечного диска, в период IV контакта — в SE-секторе.

Уменьшение радиосигнала от Солнца (рис. 7) начинается при покрытии раньше I контакта лимба Луны с оптическим диском Солнца и продолжается после IV контакта при открытии. Величина опережения/задержки зависит от длины волны и, как видно из положений лимбов Луны на моменты 1–4 и 5–8, связана с наличием повышенного излучения короны над краем Солнца.

В целом, для спокойного Солнца распределение радиояркости в микроволновом диапазоне можно представить как сумму трех компонент: равномерно светящегося диска с радиусом, превышающим оптический радиус Солнца, локального урчания вблизи лимба и плавного уменьшения

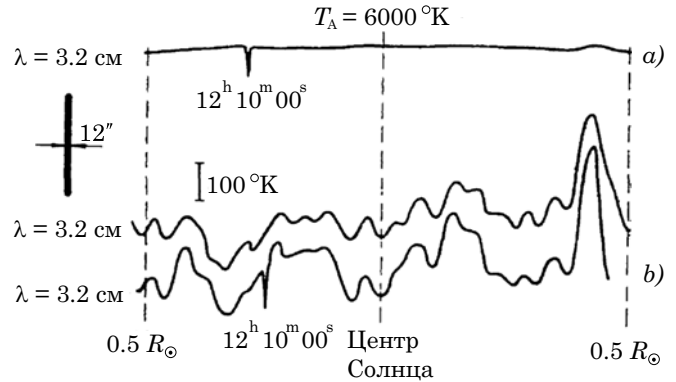


Рис. 6. Вид центральной части РАТАН-скана ($\pm 0.5 R_{\odot}$) Солнца, демонстрирующий характерный вид радиогрануляции по наблюдениям с высоким ($12''$) одномерным угловым разрешением [8]. T_A — антенная температура в мелком (a) и крупном (b) масштабах

радиояркости с увеличением высоты в короне. Во время затмения каждая из компонент дает свой специфический вклад в наблюдаемую затменную кривую.

Разделение оригинальной затменной кривой на три компоненты возможно только путем численного моделирования хода затмения с учетом положения диаграммы радиотелескопа, ее размеров и формы. Но некоторые оценки можно получить и более простыми способами (рис. 8).

Так, в качестве верхней оценки радиорadiusа можно использовать момент, когда сигнал начинает уменьшаться в районе I контакта (на рис. 8 справа это момент 2 для края Луны) или перестает возрастать в районе IV контакта.

Другой метод — это использованный ранее для исследования тонкой структуры локальных источников радиоизлучения — вычисление производной от затменной кривой с одновременным ее сглаживанием, в результате которого можно получить распределение яркости в прилиббовой зоне (рис. 8). Аппроксимация кривых для 3.5 см и 13 см в области за лимбом (жирные наклонные линии) позволяет найти момент, когда яркость уменьшится вдвое (вертикальные стрелки). По разности этих моментов и момента IV контакта можно определить локальное превышение радиорadiusа по сравнению с радиусом оптического диска.

Результаты применения описанных выше приближенных методов для волн, использованных в наблюдениях, представлены на рис. 9. Значения радиорadiusов получены усреднением по всем измерениям, проведенным во время затмения на одинаковых волнах на всех инструментах. Видно, что подтверждается ожидаемое увеличение радиорadiusа с длиной волны. Особо надо отметить значительное уменьшение радиорadiusа

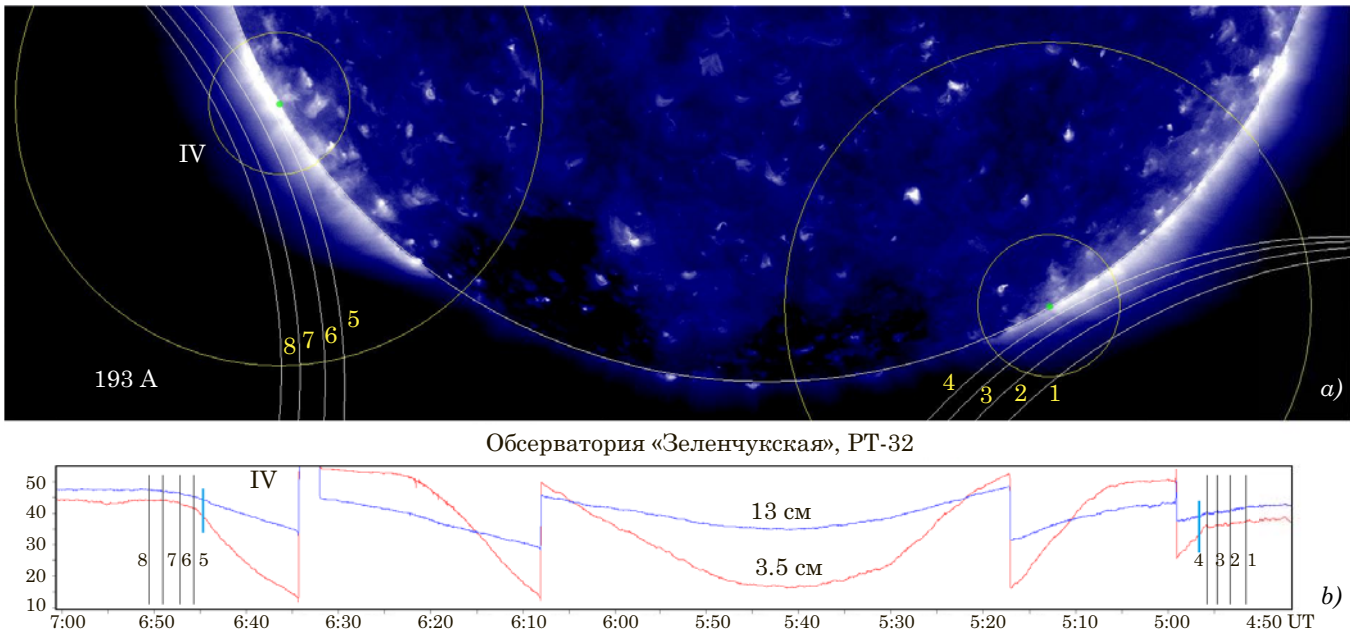


Рис. 7. *a*: изображение Солнца в линии 193Å (по SDO/AIA) с положением лимбов Луны в районе I и IV контактов для телескопа РТ-32 в РАО «Зеленчукская» и указанием размеров диаграммы направленности радиотелескопа (в виде окружностей) для волн 3.5 см (3.94) и 13 см (13.6). *b*: оригинальные затменные кривые интенсивности радиоизлучения Солнца на волнах 3.5 см и 13 см. Нумерация вертикальных линий соответствуют нумерации положений лимба Луны на верхней части рисунка

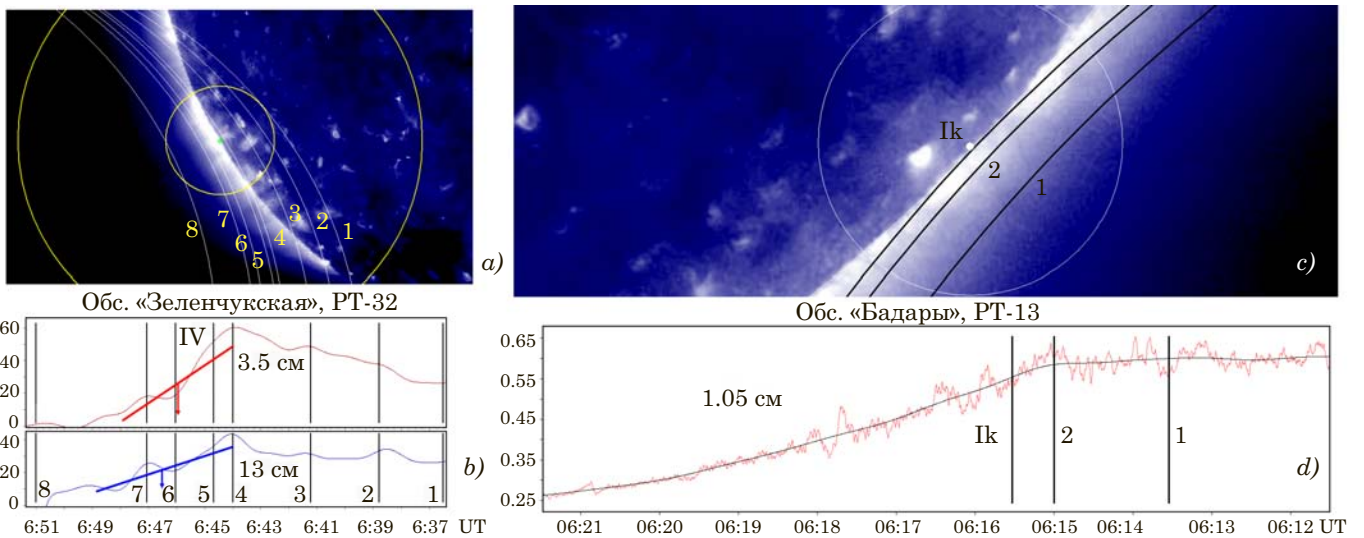


Рис. 8. *d*: оригинальная затменная кривая в районе I контакта, полученная в РАО «Бадарь» на телескопе РТ-13 на волне 1.05 см, и ее гладкая аппроксимация. *c*: изображение Солнца в линии 193Å (по SDO/AIA) с положениями лимбов Луны для трех разных моментов времени (1, 2 и Iк). Окружностью отмечено положение и размер диаграммы направленности телескопа. *b*: сглаженное распределение яркости радиоизлучения Солнца (производная от затменной кривой) на 3.5 см и 13 см по наблюдениям вблизи SW- лимба Солнца (IV контакт)

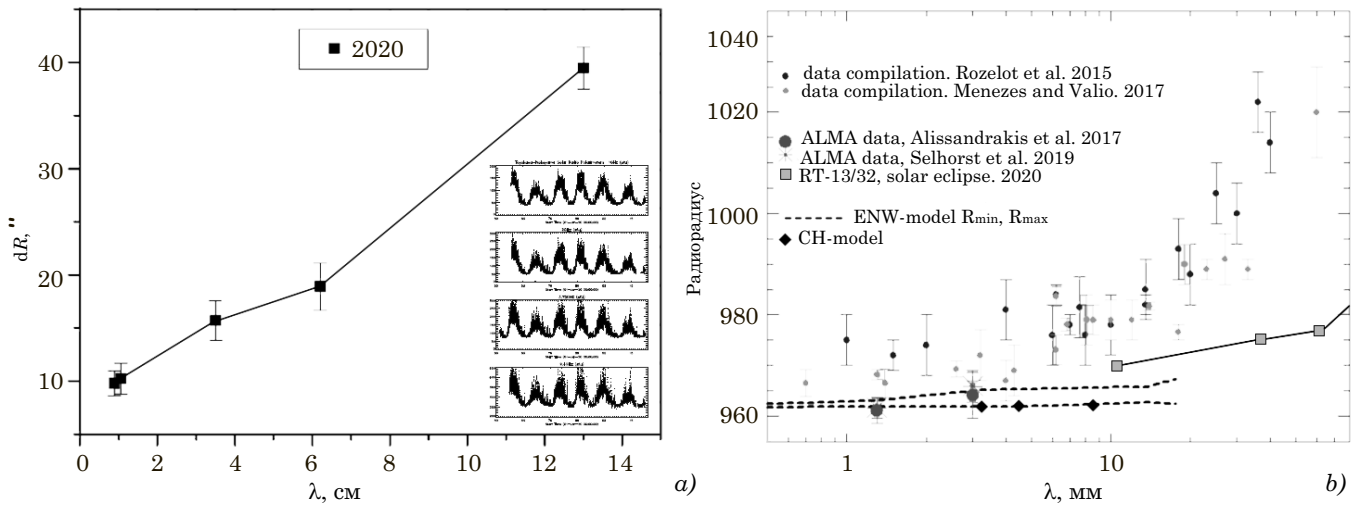


Рис. 9. *a*: превышение радиорадиуса над радиусом оптического диска Солнца по наблюдениям солнечного затмения 21.06.2020 г., выполненным на радиотелескопах ИПА РАН. *b*: сравнение результатов модельных расчетов радиорадиуса (две пунктирные кривые) с компиляцией результатов других наблюдений [10]. На вставке данные NoRH, взятые по адресу https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/solar_cycle.html

по сравнению с более ранними наблюдениями затмений [11], что позволяет интерпретировать этот результат как следствие уменьшения яркости короны в период солнечных минимумов. Однако это касается активной короны — полный поток спокойного Солнца в период минимумов 11-летних циклов, начиная с 19-го цикла, до настоящего времени остается неизменным вот уже в течение 5-ти циклов солнечной активности в широком диапазоне частот (1–9.4) ГГц (рис. 9).

Значимость наблюдений солнечных затмений радиотехническими методами в эпоху спутниковой астрономии и интернета определяется тем, что наблюдается самая нижняя часть короны, в то время как LASCO дает сведения об очень далеких ее областях — более двух солнечных радиусов.

Заключение

При наблюдении солнечного затмения 21.06.2020 г. (фаза 0.17–0.24) с помощью полноповоротных радиотелескопов РТ-32, РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадарь» были получены следующие результаты:

— установлено, что в области спокойного Солнца угловые размеры отдельных деталей радиогрануляции составляют менее 10", и отмечается высокая степень корреляции между флуктуациями на короткой (3.5 см) и длинной (13 см) волнах. По сравнению с наблюдениями на РАТАН-600 затменные наблюдения значительно уточняют размеры деталей радиогрануляции на длинной волне 13 см;

— в области приполярной корональной дыры не обнаружено отличий в характере радиогрануляции и радиояркости излучения по сравнению с областью спокойного Солнца;

— получена оценка радиорадиуса Солнца, оказавшаяся значительно ниже значений, полученных ранее другими авторами.

Благодарность

Работа Петеровой Н. Г. выполнялась в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, по теме «Исследования динамических характеристик активных образований в атмосфере Солнца в широком диапазоне волн», регистрационный номер: 0037-2021-0010.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Литература

1. Ахмедов Ш. Б., Ипатов А. В. и др. Наблюдения солнечного затмения 11 августа 1999 г. на радиоастрономической обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2000. Вып. 5. С. 5–14.
2. Финкельштейн А. М., Топчило Н. А., Петерова Н. Г. и др. Предварительные результаты наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопах РТ-32 (Светлое), РТ-32 (Зеленчукская), РТ-2,5 (Петергоф) и БПР (Пулково) // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 14. С. 33–42.
3. Финкельштейн А. М., Рахимов И. А., Дьяков А. А. и др. Наблюдения солнечного затмения 04.01.2011 г. на двух радиотелескопах РТ-32 (Светлое и Зеленчукская): первые результаты // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 25. С. 154–159.
4. Рахимов И. А., Дьяков А. А., Ипатов А. В. и др. Солнечное затмение 20.03.2015 по наблюдениям на двух радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» (первые результаты) // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 39. С. 81–90.

5. Апушкинский 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, 1972. С. 33–38.

6. Гельфрейх Г. Б., Дравских А. Ф., Старишинов 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, 1972. С. 38–41.

7. Рахимов И. А., Дьяков А. А., Олифинов В. Г. и др. Солнечное затмение 21.06.2020 г. по наблюдениям на радиотелескопах ИПА РАН (первые результаты) // Труды XXIV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика — 2020», Октябрь 2020 г. ГАО РАН: Санкт-Петербург, 2020. С. 261–264.

8. Богод В. М., Корольков Д. В. Обнаружение хромосферной сетки в сантиметровом диапазоне волн // Письма в АЖ. 1975. Т. 1, вып. 10. С. 25–27.

9. Bogod V. M., Alissandrakis C. E., Kaltman T. I., Tokhchukova S. K. RATAN-600 Observations of Small-Scale Structures with High Spectral Resolution // Solar Phys. 2015. Vol. 290, Iss. 2. P. 7–20. DOI 10.1007/s11207-014-0526-6.

10. Нагнибеда В. Г., Топчило Н. А., Рахимов И. А. и др. Особенности распределения радиояркости по диску солнца на ММ волнах: модели и наблюдения // Труды XXIV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика — 2020», Октябрь 2020 г. ГАО РАН: Санкт-Петербург, 2020. С. 239–242.

11. Юровский Ю. Ф. Наблюдения в Крыму солнечного затмения 1 августа 2008 г. на волнах 10.5 и 12 см в эпоху минимума солнечной активности // Изв. КРАО. 2009. Т. 105, № 1. С. 57–65.