

## Итоги исследований Солнца по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН за период 1999–2022 гг.

© Д. В. Иванов<sup>1</sup>, И. А. Рахимов<sup>1</sup>, А. А. Дьяков<sup>1</sup>, В. Г. Олифинов<sup>1</sup>, Г. Н. Ильин<sup>1</sup>, Н. Г. Петерова<sup>2</sup>, Н. А. Топчило<sup>3</sup>, А. В. Ипатов<sup>1</sup>, Т. С. Андреева<sup>1</sup>, Е. Ю. Хвостов<sup>1</sup>, В. Ю. Быков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Изначально радиоастрономический РСДБ-комплекс «Квazar-КВО» ИПА РАН был предназначен для решения задач в области космической геодезии. Однако его технические характеристики оказались очень подходящими для проведения исследований микроволнового излучения Солнца, при использовании наблюдений солнечных затмений. Они ведутся на радиотелескопах ИПА РАН уже в течение двух 11-летних циклов солнечной активности 1999–2022 гг. Задача данной работы состояла в том, чтобы обобщить полученные результаты с целью определения возможностей и перспектив дальнейшего развития исследований Солнца в ИПА РАН.

В статье представлен обзор всех 9 проведенных наблюдений затмений. Приведено краткое описание используемого метода наблюдений и их обработки, а также технических характеристик приемной аппаратуры и системы регистрации. Использованный метод считается наилучшим по точности координатных измерений и позволяет достичь предельно допустимое дифракцией значение  $\sim 3$  угл. сек.

Приведены основные результаты наблюдений, касающиеся тонкой пространственной структуры и спектрально-поляризационных характеристик отдельных локальных деталей источников излучения (солнечные пятна, межпятенное излучение, радиогрануляция, протуберанцы). Выполнено измерение эффективной яркостной температуры Солнца и его радиорadiusа. Анализ результатов показал, что с развитием инструментальной базы качество полученных результатов постоянно увеличивалось и в настоящее время находится на хорошем современном уровне. Для дальнейшего повышения качества и результативности исследований рекомендуется дополнить их более длинными, внезатменными наблюдениями Солнца с использованием новых методик, выбирая моменты, когда инструменты не задействованы для выполнения основных навигационных задач.

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

*Контакты для связи:* Рахимов Исмаил Ахмедович ([rahimov@iaaras.ru](mailto:rahimov@iaaras.ru)), Ильин Геннадий Николаевич ([igen@iaaras.ru](mailto:igen@iaaras.ru)), Топчило Николай Андреевич ([topchilona@yandex.ru](mailto:topchilona@yandex.ru)).

**Для цитирования:** Иванов Д. В., Рахимов И. А., Дьяков А. А., Олифинов В. Г., Ильин Г. Н., Петерова Н. Г., Топчило Н. А., Ипатов А. В., Андреева Т. С., Хвостов Е. Ю., Быков В. Ю. Итоги исследований Солнца по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН за период 1999–2022 гг. // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 65. С. 7–22.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.65.7-22>

## Results of Solar Research Based on Observations of Solar Eclipses at the IAA RAS radio Telescopes for the Period 1999–2022

D. V. Ivanov<sup>1</sup>, I. A. Rakhimov<sup>1</sup>, A. A. Diakov<sup>1</sup>, V. G. Olifirov<sup>1</sup>, G. N. Ilin<sup>1</sup>, N. G. Peterova<sup>2</sup>, N. A. Topchilo<sup>3</sup>, A. V. Ipatov<sup>1</sup>, T. S. Andreeva<sup>1</sup>, E. Yu. Khvostov<sup>1</sup>, V. Yu. Bykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg branch of Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

Initially, the Quasar VLBI Network of the IAA RAS was intended to solve some tasks in the field of space geodesy. However, its technical characteristics turned out to be very suitable for conducting studies of the microwave emission of the Sun using observations of solar eclipses. They have been conducted at the IAA RAS radio telescopes for two 11-year cycles of solar activity (1999–2022) already. The objective of this work was to generalize the results obtained in order to determine the possibilities and prospects for further development of solar research at the IAA RAS.

The article presents an overview of all 9 eclipse observations made. A brief description of the used method of observations and their processing is given as well as the technical characteristics of the receiving equipment and the registra-

tion system. The method used is considered the best in terms of the accuracy of coordinate measurements, which makes it possible to reach the maximum allowable diffraction value of  $\sim 3$  arcsec.

The main results of the observations concerning the fine spatial structure and spectral-polarization characteristics of individual local details of radiation sources (sunspots, interspot radiation, radiogranulation, prominences) are presented. The effective brightness temperature of the Sun and its radio radius are measured. Analysis of the results showed that with the development of the instrumental base, the quality of the results obtained was constantly increasing and it is currently at a good modern level. To further improve the quality and effectiveness of studies, it is recommended to supplement them with longer, non-eclipsing observations of the Sun using new techniques, choosing the moments when the instruments are not involved in performing the main navigational tasks.

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

*Contacts:* Ismail A. Rakhimov ([rahimov@iaaras.ru](mailto:rahimov@iaaras.ru)), Gennady N. Ilin ([igen@iaaras.ru](mailto:igen@iaaras.ru)), Nikolay A. Topchilo ([topchilona@yandex.ru](mailto:topchilona@yandex.ru)).

**For citation:** Ivanov D. V., Rakhimov I. A., Diakov A. A., Olifirov V. G., Ilin G. N., Peterova N. G., Topchilo N. A., Ipatov A. V., Andreeva T. S., Khvostov E. Yu., Bykov V. Yu. Results of solar research based on observations of solar eclipses at the IAA RAS radio telescopes for the period 1999–2022 // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 65. P. 7–22.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.65.7-22>

## Введение

История отечественных наблюдений солнечных затмений на микроволнах восходит к 1947 г. ([Хайкин, 1947](#)), когда было сделано важное заключение — подтверждено предсказанное теорией существование горячей короны. С тех пор начал развиваться и совершенствоваться метод фундаментальных исследований Солнца, который можно назвать «затменным». Большой вклад в его реализацию был внесен пулковскими радиоастрономами ([Молчанов и др., 1958](#); [Гельфрейх, Коржавин, 1972](#)). В период 1947–2000 гг. с их участием успешно прошли наблюдения  $\sim 20$  солнечных затмений, некоторые из которых потребовали огромных усилий по транспортировке тяжеловесных радиотелескопов (Китай в 1958 г.). Значительно облегчить эту задачу позволил ввод в эксплуатацию радиотелескопов «Квазар-КВО», оказавшихся очень удачно расположенными относительно полосы, в которой наблюдаются затмения, благодаря чему это редкое природное явление удалось наблюдать довольно часто — в среднем каждые 2 года, причем в двух–трех обсерваториях одновременно. После затмения 25.10.2022 г. наступает довольно длительный период, когда с территории России наблюдать затмения будет или невозможно, или покрываться будет незначительная часть Солнца: на затмении 2025 г. — 14 %, а в 2027 г. — 5 и 31 %. Лишь во время затмения 2030 г. площадь покрытия составит более 50 %, причем во всех трех обсерваториях (от 56 до 84 %).

Сейчас мы ставим задачу подвести итоги и предложить другие методы для продолжения исследований микроволнового излучения Солнца с использованием радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», учитывая ранее полученные результаты, касающиеся: 1) исследований спокойного Солнца (проблема уярчения на лимбе и протяженности спокойной хромосферы) и 2) исследований различного рода сильно структурированных обра-

зований на диске Солнца и за его лимбом (флоккульные уярчения, активные области, протуберанцы, корональные дыры, грануляция). Необходимо отметить, что не все материалы проведенных наблюдений еще достаточно полно обработаны. К тому же, можно ожидать получение новых результатов, если использовать теперь легко доступные дополнительные сведения об излучении Солнца в УФ- и X-ray диапазонах.

## Приемная аппаратура и методы наблюдений

Наблюдения Солнца на телескопах РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» ведутся в режиме, когда входящие в ее состав крупные полноповоротные инструменты РТ-32, РТ-13 и радиометр водяного пара (РВП) используются как одиночные зеркала. Приемная аппаратура «Квазар-КВО» неоднократно модернизировалась путем введения в строй новых радиотелескопов и расширения диапазона частот. Сейчас это сложный комплекс устройств, параметры которых приведены в табл. 1, где ДН — ширина диаграммы направленности на уровне 0.5, а РЛА — рупорно-линзовая антенна в РВП ([Arseev, 2017](#)).

Методика наблюдений затмения состоит в слежении на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13 за избранным местом на диске Солнца во время его покрытия/открытия диском Луны. Места наведения выбираются предварительно, исходя из регулярных многоволновых наблюдений Солнца, в частности на радиотелескопах РАТАН-600, в космической обсерватории SDO и наземных оптических обсерваториях. РВП в течение всего затмения наводится на центр диска Солнца и следит за ним. Пример расположения источников и порядок их наблюдения показан для затмения 25.10.2022 г. на рис. 1. Обозначения объектов наблюдения: AR — активные области (АО), FL — флоккульные площадки, I — первый контакт, IV — четвертый контакт, QS — спокойное Солнце. Белыми дугами, пронумерованными от 1 до 8, показаны положения

Таблица 1

Параметры приемной аппаратуры и радиотелескопов ИПА РАН

Телескоп	РТ-32 и РТ-13			РВП-4		
	Диапазон частот, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, угл. мин	Приемные каналы	Диапазон частот, ГГц	Ширина ДН РЛА, градусы
РТ-32*	S: 2.15–2.5	13	14.6	А	$20.7 \pm 0.25$	по азимуту: $6.0 \pm 0.10$ по высоте: $6.3 \pm 0.08$
	C: 4.6–5.1	6.2	6.6			
	X: 8.18–9.08	3.5	3.94			
РТ-13	S: 2.2–2.4	13	34	Б	$31.4 \pm 0.5$	по азимуту: $5.45 \pm 0.13$ по высоте: $5.43 \pm 0.05$
	X: 8.0–8.5	3.6	9			
	Ка (Ка2): 28–28.5	1.06	2.7			
	Ка (Ка3): 33.5–34.0	0.89	2.3			

\* Одновременно на радиотелескопах РТ-32 могут проводиться наблюдения в S- и X-диапазонах или в C-диапазоне. Обычно наблюдения выполняются в S- и X-диапазонах. Но если затмения происходят в двух обсерваториях, то на втором РТ-32 наблюдения проводятся в C-диапазоне

лимба Луны в моменты прохождения им центра ДН для соответствующего источника. Значения моментов (в UT) приведены справа от рисунков.

Перестановка антенн с источника на источник производится в период между указанными моментами.

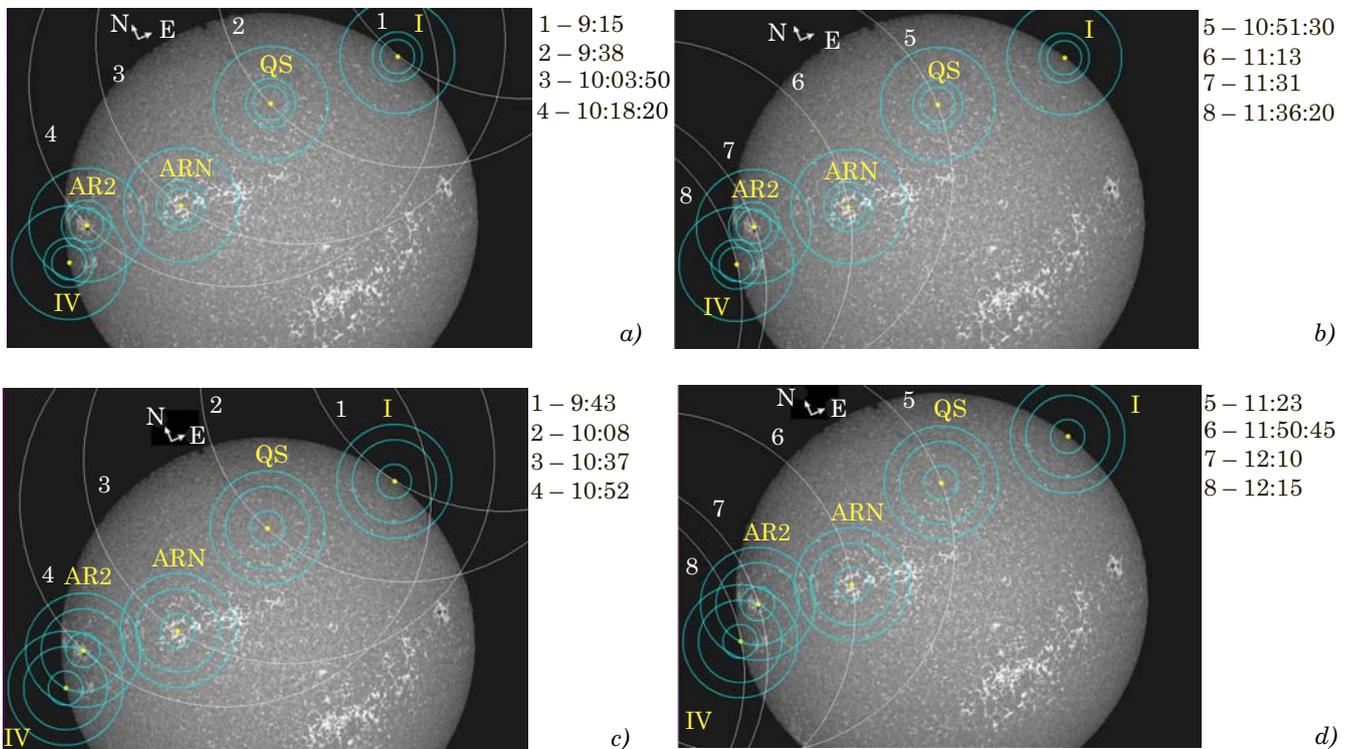


Рис. 1. Схема расположения точек наведения радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 на затмении 25.10.2022 г.: *a* — покрытие в РАО «Светлое», *b* — открытие в РАО «Светлое», *c* — покрытие в РАО «Зеленчукская», *d* — открытие в РАО «Зеленчукская». Голубые окружности — ДН в порядке возрастания их размеров: для РАО «Светлое» — волны  $\approx 1$  см (РТ-13), 3.5 см (РТ-32) и 3.6 см (РТ-13), для РАО «Зеленчукская» — волны  $\approx 1$  см (РТ-13), 6.2 см (РТ-32) и 3.6 см (РТ-13)

В результате наблюдений на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 на всех волнах получают независимые записи в правой (R) и левой (L) круговых поляризациях (0.89 см, 1.06 см, 3.5 см, 6.2 см и 13 см), на РВП — в интенсивности на двух волнах (на 0.96 и 1.45 см). Пример оригинальных затменных кривых показан на рис. 2.

Для получения количественных характеристик источников излучения применяется определенная методика обработки (Финкельштейн и др., 2006). Она состоит из следующих процедур:

1. Приведение кривых, полученных в параметрах R и L, к одному масштабу: способом выравнивания усиления по участкам «спокойного» Солнца, излучение которого слабо поляризовано.

2. Вычисление производной с целью получения распределения яркости и ее осреднение с помощью аппаратной функции (гауссианы), при изменении размера которой можно выбрать оптимальную функцию с точки зрения подавления шумов. Последняя определяет эффективное разрешение, достигнутое в затменных наблюдениях.

3. Выделение активных областей на фоне «спокойного» Солнца, в качестве которого может служить рассчитанная кривая покрытия площадей.

4. отождествление отдельных деталей распределения радиояркости путем сопоставления с фотогелиограммой Солнца и его изображением в других диапазонах электромагнитного излучения.

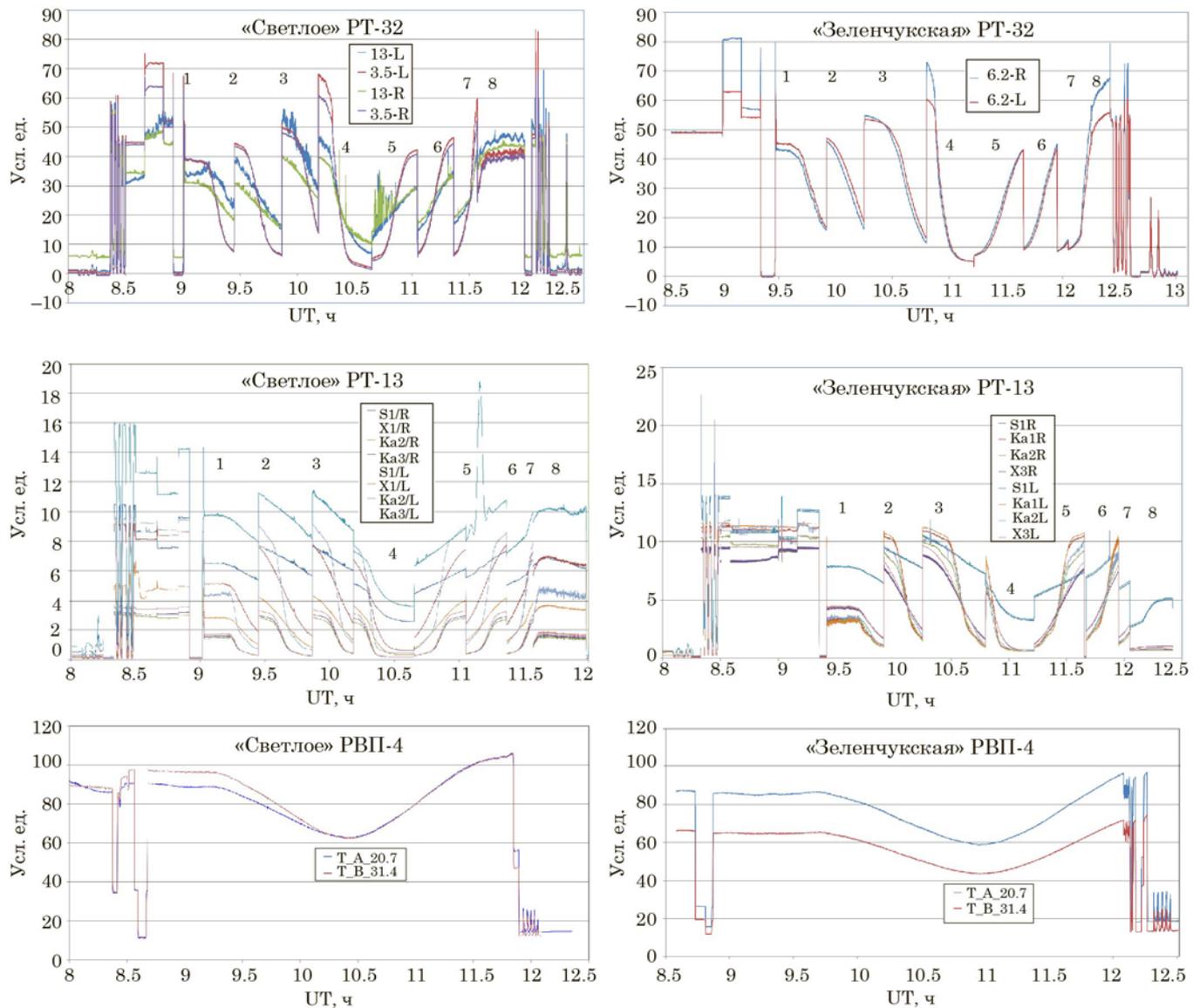


Рис. 2. Оригинальные некалиброванные затменные кривые, полученные при наблюдении затмения 25.10.2022 г. До и после затменных кривых производилась запись калибровочных операций (слежение за атмосферой и спокойным Солнцем, сканирование Солнца и Луны)

Полный список наблюдений затмений Солнца в ИПА РАН

№	Дата	Обсерватории	Максимальная фаза, %	Использованные телескопы	Публикации
9	25.10.2022	«Светлое» «Зеленчукская»	58.9 57.1	РТ-32, РТ-13, РВП-4 РТ-32, РТ-13, РВП-4	<a href="#">(Иванов и др., 2023)</a>
8	10.06.2021	«Светлое» «Бадарь»	27.0 42.6	РТ-32, РТ-13, РВП-4 РТ-32, РТ-13	<a href="#">(Иванов, Ипатов и др., 2021)</a> <a href="#">(Pin et al., 2022)</a>
7	21.06.2020	«Зеленчукская» «Бадарь» «Уссурийск»	17.5 23.9 24.3	РТ-32, РТ-13 РТ-32, РТ-13 РТ-2	<a href="#">(Рахимов и др., 2020)</a> <a href="#">(Иванов, Рахимов и др. 2021)</a>
6	20.03.2015	«Светлое» «Зеленчукская»	74.5 24.2	РТ-32, РТ-13 РТ-32, РТ-13	<a href="#">(Рахимов и др., 2016)</a>
5	04.01.2011	«Светлое» «Зеленчукская»	78.7 60.9	РТ-32 РТ-32	<a href="#">(Финкельштейн и др., 2012)</a> <a href="#">(Korzhev et al., 2012)</a>
4	01.08.2008	«Светлое» «Зеленчукская»	53.2 26.0	РТ-32 РТ-32	
3	29.03.2006	«Светлое» «Зеленчукская»	36.8 99.9	РТ-32 РТ-32	<a href="#">(Финкельштейн и др., 2006)</a>
2	03.05.2003	«Светлое» «Зеленчукская»	77.5 54.7	РТ-32 РТ-32	
1	11.08.1999	«Светлое»	53.0	РТ-32	<a href="#">(Ахмедов и др., 2000)</a>

В табл. 2 представлен полный список наблюдений солнечных затмений, проведенных на радиотелескопах ИПА РАН, с указанием их характеристик. В графе «Публикации» — первые или основные публикации для соответствующих затмений.

Прошедшие наблюдения распределены достаточно равномерно по времени и охватывают два 11-летних солнечных цикла (рис. 3). В результатах наблюдений представлено большинство фаз солнечной активности — фаза роста, фаза спада и фаза солнечного минимума. Фаза максимума солнечного цикла в наблюдениях пока не встречалась. Но, основываясь на опыте наблюдений фаз

роста и спада, можно ожидать большой вероятности регистрации разного рода вспышечных проявлений.

Набор исследуемых объектов в большой степени определялся фазой солнечной активности и ее распределением по солнечному диску на свободных и покрываемых во время затмения участках. В большинстве случаев наблюдались I и IV контакты, как представители спокойной прилиम्бовой компоненты солнечного излучения, и участки спокойного Солнца в центральной части солнечного диска, специально отобранные по результатам предзатменных наблюдений. В период повышенной солнечной активности приоритет отдавался наблюдениям больших активных областей с крупными пятнами. При низкой активности наблюдались флоккульные площадки, корональные дыры и мелкомасштабная фоновая активность.

Далее представлены обобщенные результаты, полученные для объектов различного типа.

### Исследование активных областей

По своей природе затменная кривая — это результат наблюдений с одномерным разрешением. По сравнению с аналогичными наблюдениями, выполняемыми на инструментах типа БПР, РАТАН-600 (одномерные сканы), они имеют преимущества благодаря высокой точности координатных измерений и высокой разрешающей способности. Продемонстрируем это на материалах первого наблюдения затмения в ИПА РАН (1999 г.), на примере исследований структуры и параметров источников S-компоненты микроволнового излучения, располагающихся над ак-

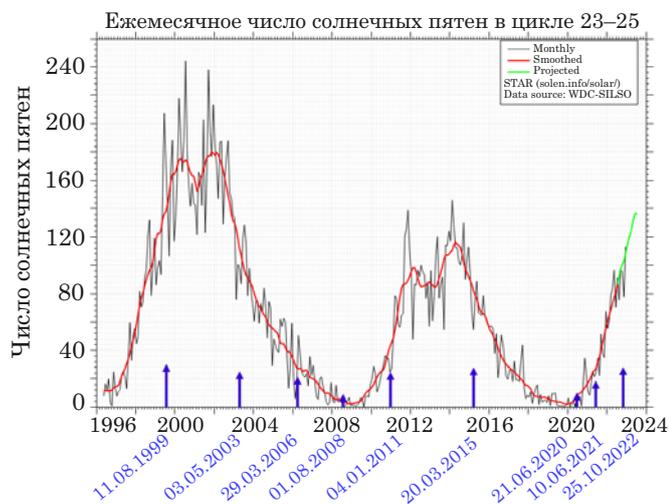


Рис. 3. Уровень активности Солнца в дни наблюдения затмений

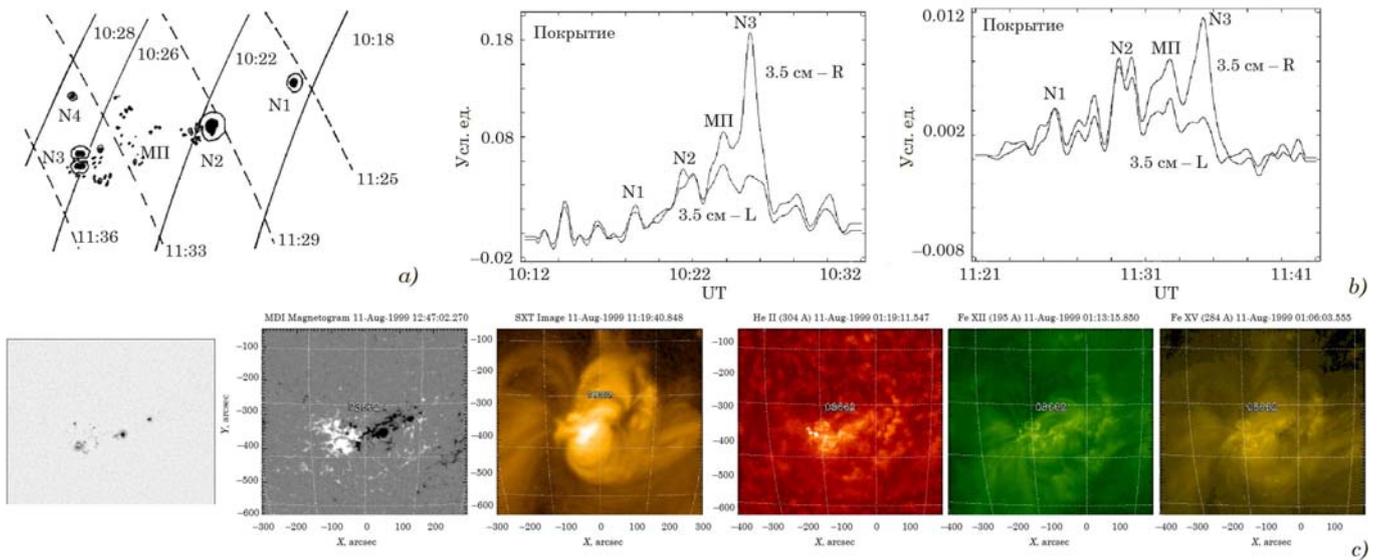


Рис. 4. *a* — оптическая картина активной области АО 8662 (Ахмедов и др., 2000): N 1,2,3,4 — номера пятен, МП — межпятенная область: дуги — положения края лунного диска на диске Солнца, в указанные моменты UT (затмение 1999 г.). *b* — покрытие и открытия области AR 8662 на волне 3.5 см. Приведены производные от затменных кривых для обеих поляризаций. *c* — вид активной области в белом свете, ее магнитное поле и изображения в УФ с космической обсерватории SOHO

тивными областями (рис. 4). Источники этого типа являются самыми яркими и наиболее исследованными. Благодаря указанным преимуществам затменного метода наблюдений удается более надежно выделить пятенные детали структуры изображения и указать на особенности межпятенного излучения (см. пометку МП на рис. 4). Межпятенное излучение было обнаружено еще в 60-е годы прошлого века, но его природа остается дискуссионной. В частности, можно предположить, что это квазиспокойный источник над нейтральной линией магнитного поля АО, представляющий из себя аркаду плотных горячих низких петель (яркостная температура  $T_b \sim 10$  МК) (Ахмедов и др., 2000).

Другим важным достоинством затменных наблюдений является возможность при благопри-

ятных астрономических обстоятельствах получить квазидвумерное изображение источника излучения, как это случилось при наблюдении затмения 29.03.2006, показанном на рис. 5. Двумерный вид этого изображения сильно влияет на оценку яркостной температуры излучения — она может быть как заниженной, так и завышенной, если измеряется при использовании одиночных сканов БПР или РАТАН-600.

Рис. 5 также демонстрирует преимущество наблюдений на нескольких пространственно далеко разнесенных радиотелескопах. Наблюдение только в РАО «Зеленчукская» не позволило бы определить размеры АО в вертикальном (N-S) направлении. Наблюдения в РАО «Светлое» позволяют измерять размеры в двух направлениях. Еще лучше контуры источника определяются при

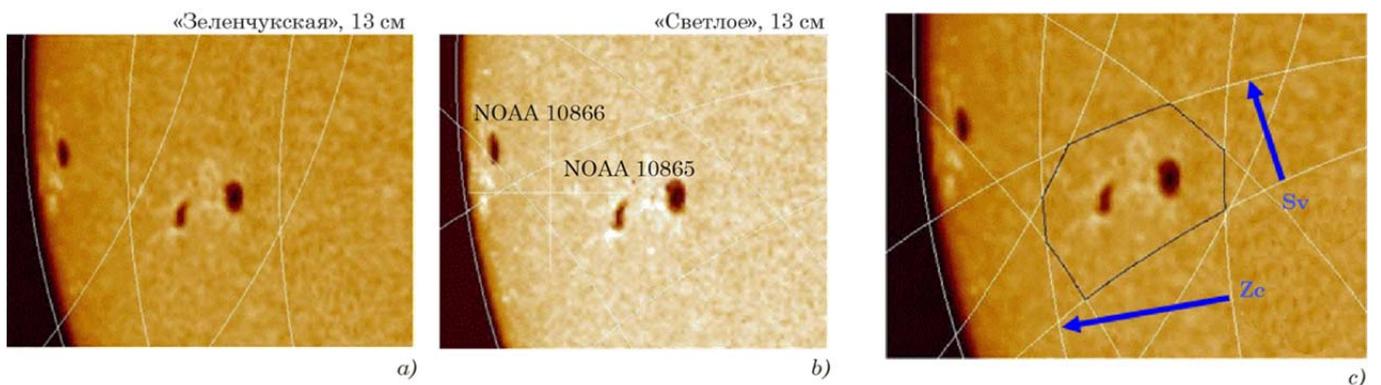


Рис. 5. Контур квазидвумерного изображения (по нулям) источника микроволнового излучения над АО NOAA 10865 (затмение 2006 г.): *a* — в РАО «Зеленчукская» и *b* — в РАО «Светлое»; *c* — объединенные контуры этих наблюдений, стрелками с обозначениями Sv и Zc показаны направления движения края Луны при покрытии АО 10865 в РАО «Светлое» и «Зеленчукская» соответственно

совместном использовании обеих обсерваторий (рис. 5с). Интересно, что для данного затмения хорошее сочетание контуров можно получить и в сокращенном варианте наблюдений, например, используя только покрытие источника, но в обеих обсерваториях (положения лимбов, соединенные стрелками, рис. 5с). Что может быть полезно в случае возникновения непредвиденных технических проблем с одним из телескопов во время затмения.

Важность совместного использования на затмениях нескольких радиотелескопов, в том числе и разного размера, показана на рис. 6, где представлены производные от затменных записей, полученных во время затмения 2006 г. на трех радиотелескопах: РТ-32 РАО «Светлое», РТ-32 РАО «Зеленчукская» и РТ-2.5 СПбГУ. В отличие от обычной практики, оба РТ-32 работали на одинаковом наборе длин волн – 3.5 и 13 см. РТ-2.5 работал на промежуточной волне 5.65 см.

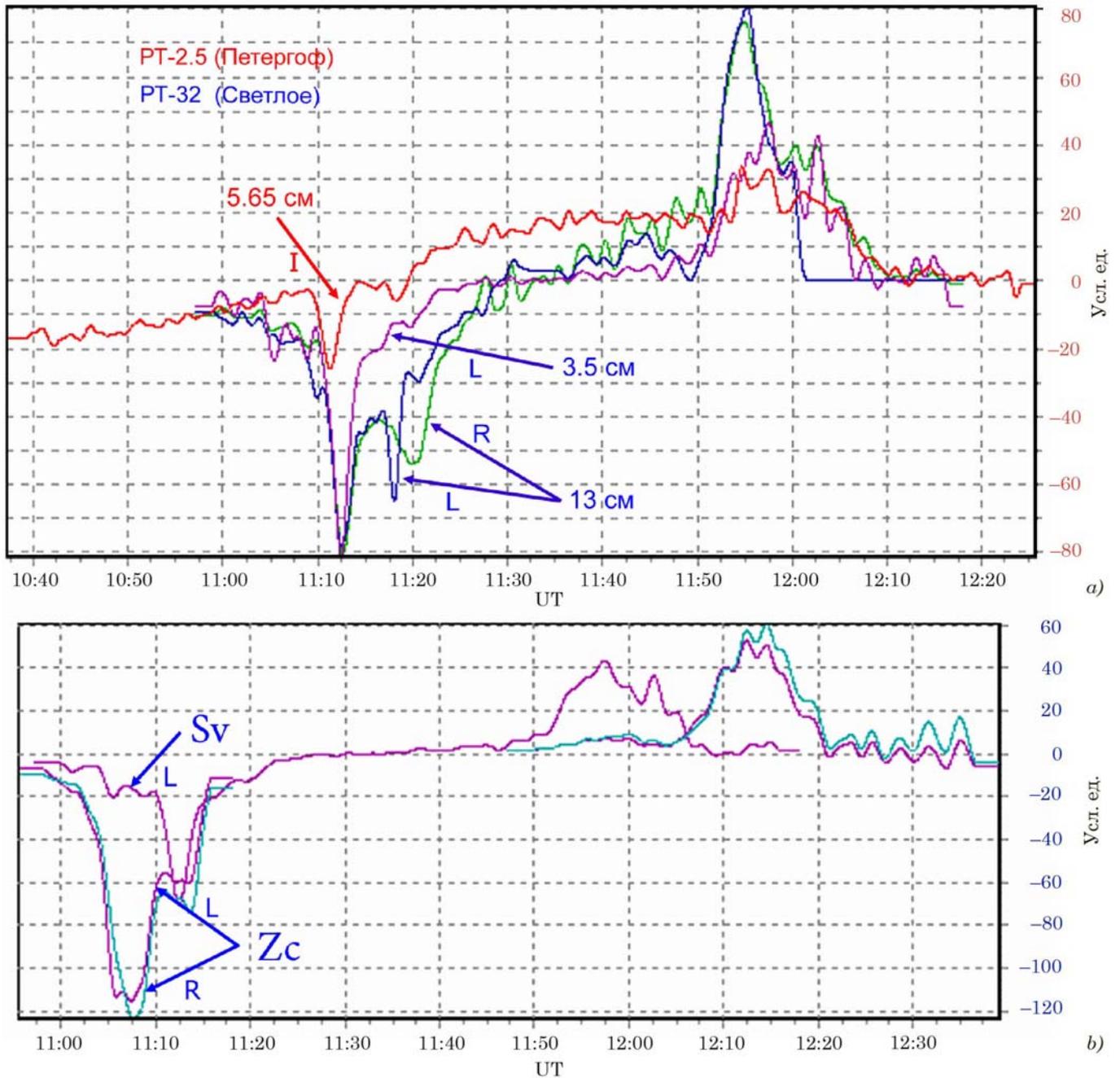


Рис. 6. *a* — ненормированное распределение яркости излучения (производная от затменных кривых) по наблюдениям на РТ-32 в РАО «Светлое» на волнах 13 см (в R- и L-поляризации) и 3.5 см (в L-поляризации), а также на 5.65 см на РТ-2.5 СПбГУ; *b* — распределение яркости излучения по наблюдениям на волне 3.5 см на двух радиотелескопах РТ-32 в РАО «Светлое» (Sv) и в РАО «Зеленчукская» (Zc)

Совмещение записей производных для радиотелескопов, работавших в районе Санкт-Петербурга, показало хорошее их соответствие (см. рис. 6*a*). Первый по времени отрицательный пик в  $\sim 11:12$  UT соответствует покрытию АО 10865. Вторые по времени пики (примерно в 11:20 UT) связаны с покрытием АО 10866. Для подавления шумов затменные кривые были сглажены так, что на графиках на всех волнах эффективное угловое разрешение  $\approx 30''$ . Добавление к наблюдениям РТ-2.5 позволяет повысить частотное разрешение наблюдений.

На рис. 6*b* сравниваются одномерные распределения радиояркости по АО 10865 на волне 3.5 см по наблюдениям на обоих РТ-32. Исходя из

положений края Луны (рис. 5*c*) видно, что наблюдаемые при покрытии распределения почти перпендикулярны друг другу: в РАО «Зеленчукская» регистрируется распределение вдоль большой оси эллипсовидного изображения АО, в РАО «Светлое» — вдоль малой оси. Это отражается в различии их размеров и структуры: в РАО «Зеленчукская» регистрируются два максимума (разрешаются два пятна в АО), и один максимум — в РАО «Светлое» (пятна сливаются).

Приведенный пример демонстрирует, что построение квазидвумерных изображений является мощным инструментом исследования структуры АО. Отчетливо выделяются участки, соответствующие моментам покрытия и открытия активных

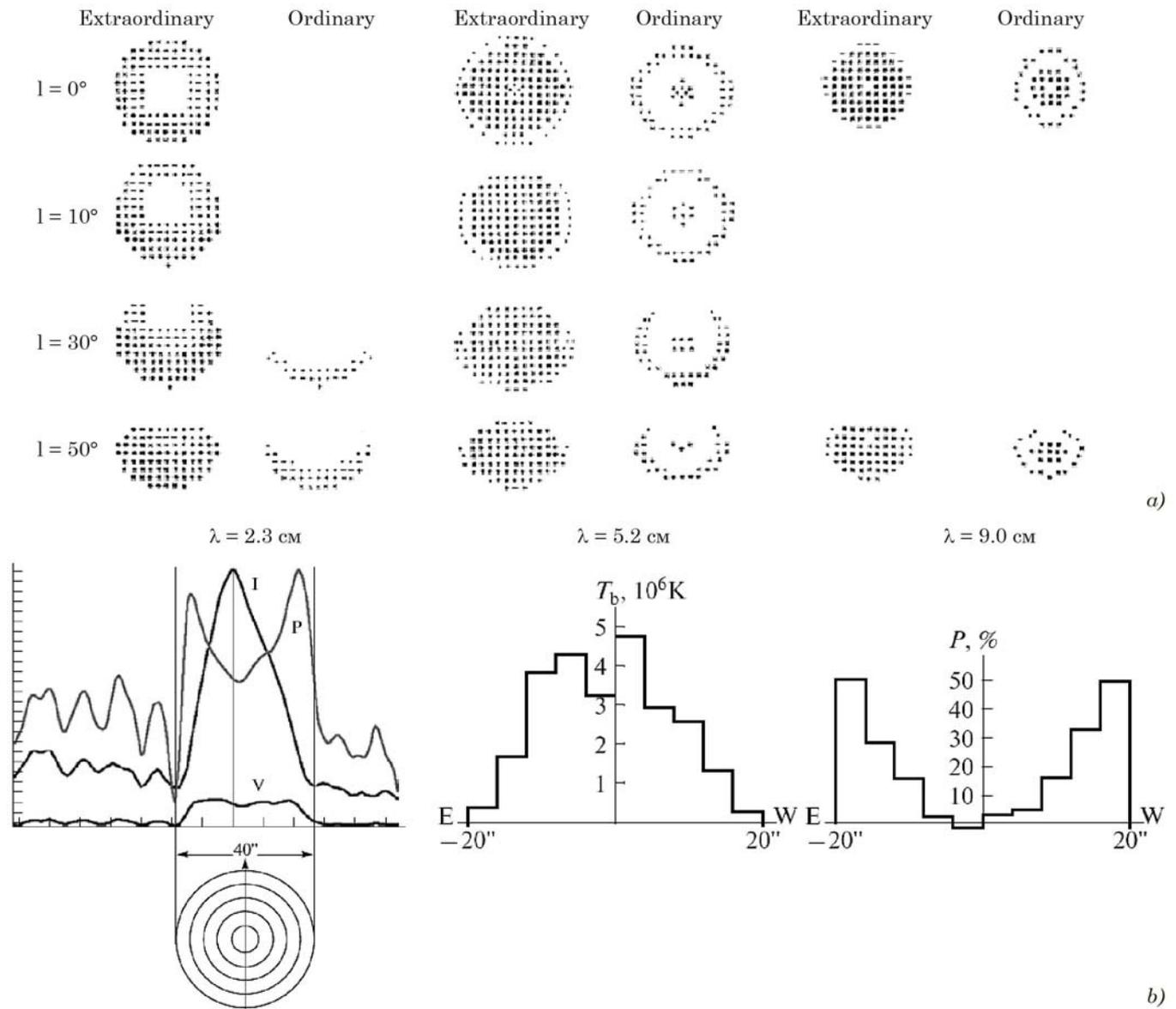


Рис. 7. *a* — модельный расчет распределения радиояркости источника циклотронного излучения над солнечным пятном, показывающий его изменения в диапазоне 2.3–9.0 см в зависимости от угла зрения 0–50 град.; *b* — одномерное распределение яркости ИЦМИ над пятном в АО 11140 (затмение 2011 г.) в интенсивности (I) и круговой поляризации (V), P — степень поляризации, графики в центре и справа — разрез через модель ИЦМИ (Korzhaev et al., 2012).

областей NOAA 10865 и 10866. Видна структура изображения и ее различия для этих моментов, объясняемые изменением позиционного угла. Видны также особенности поляризации — слабая для NOAA 10865 и сильная для 10866 (отмечено стрелками R и L).

Самый значительный астрофизический результат, основанный на построении изображений по результатам затмений, был получен нами при наблюдении затмения 04.01.2011, представивший экспериментальное доказательство существования сложного, специфического вида источника циклотронного микроволнового излучения (ИЦМИ) над солнечными пятнами. Теоретические и практические основы этого явления были разработаны в конце 60-х годов в работах Железнякова В. В. и Злотник Е. Я. Позднее в работе (Гельфрейх, Лубышев, 1979) были представлены двумерные изображения ИЦМИ для модели одиночного пятна с дипольным магнитным полем, которые продемонстрировали наличие кольцеобразных/серповидных структур, сильно зависящих от угла наклона луча зрения (рис. 7а).

В связи с малым размером солнечных пятен (средний размер пятна  $\sim 20''$ ) для прямого исследования их тонкой структуры требуется секундное угловое разрешение, которым обладают только крупные интерферометры апертурного синтеза типа VLA. К сожалению, их мало и они не совсем

подходят для солнечных наблюдений из-за большого уровня боковых лепестков синтезированной ДН.

В наблюдениях затмений на радиотелескопах ИПА РАН одномерное угловое разрешение может достигать  $1-3''$ , что позволяет в рамках определенных предположений построить модель, соответствующую стандартной модели ИЦМИ — асимметричное распределение яркостной температуры с провалом в центре пятна для затмения 2011 г. (рис. 7b). Аналогичные результаты были получены для затмения 2015 г. (Рахимов и др., 2016).

### Распределение магнитного поля пятен в зависимости от высоты в атмосфере Солнца

Наблюдения солнечных затмений, начиная с самых ранних (50-е годы), практически всегда свидетельствовали о малой высоте ИЦМИ над уровнем фотосферы ( $\sim$  или  $< 10$  тыс. км). Однако споры вокруг этой проблемы не утихают до настоящего времени (Богод, Яснгов, 2008, Богод, Яснгов, 2009). На рис. 8 показаны результаты исследований на примере наблюдений АО 11140 (затмение 2011 г.) и АО 12303 (затмение 2015 г.).

Сравнение полученного квазидвумерного радиоизображения с наблюдением в других диапазонах излучения показало, что область радиоизлучения была смещена в направлении на E-W относительно геометрического центра тени пятна, причем в ожидаемой зависимости от длины волны.

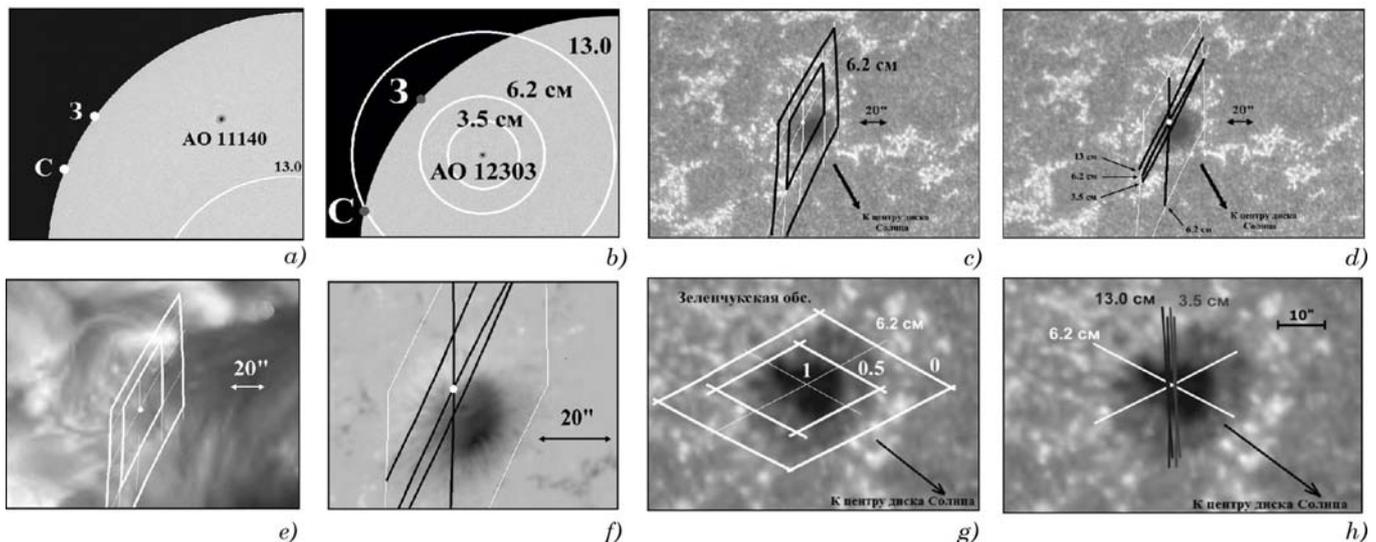


Рис. 8. *a, b* — положение активных областей на диске Солнца и IV контакта при наблюдении в РАО «Светлое» (С) и РАО «Зеленчукская» (З) для затмений 2011 г. и 2015 г. Белые окружности показывают размер ДН на использованных волнах; *c, d* — изображение пятна в активной области NOAA 11140 в линии  $1700\text{\AA}$ ; *e, f* — наложение результатов измерений на изображении в линии  $211\text{\AA}$  (*e*) и на магнитное поле пятна (*f*). Все изображения получены на SDO. Приведены внешние и внутренние границы источника излучения на волне 6.2 см, полученные при покрытии и открытии источника Луной, соответствующие его протяженности на уровне нуля в распределении яркости и на уровне половинной мощности соответственно. Белой точкой указано положение максимальной яркости излучения (Петерова и др., 2016; Korzhavin et al., 2012). Кривые линии (на рис. *d* и *f*) показывают положение края Луны при прохождении максимума источника на волнах 3.5, 6.2 и 13.0 см. *g, h* — аналогичные результаты для наблюдения головного пятна в активной области NOAA 12303 во время затмения 2015 г. (Рахимов и др., 2016)

Чем длиннее волна, тем выше источник радиоизлучения расположен над уровнем фотосферы. Положение (в картинной плоскости) точки максимальной яркости радиоизлучения источника на 6.2 см приходится приблизительно на границу между тенью и полутенью пятна. По измерениям на волнах 3.5 см, 6.2 см и 13 см величина смещения составляет соответственно 2.5–3.8", 7.7–9" и 12".

Есть основания полагать, что высота ИЦМИ еще меньше, если допустить, что часть наблюдаемого смещения произошла по другим причинам. Одна из них — эффект Гельфрейха-Лубышева (Петерова, 2016), под влиянием которого изображение источника смещается в том же направлении, и учесть это можно только с помощью моделирования, т. е. получить лишь оценочные значения.

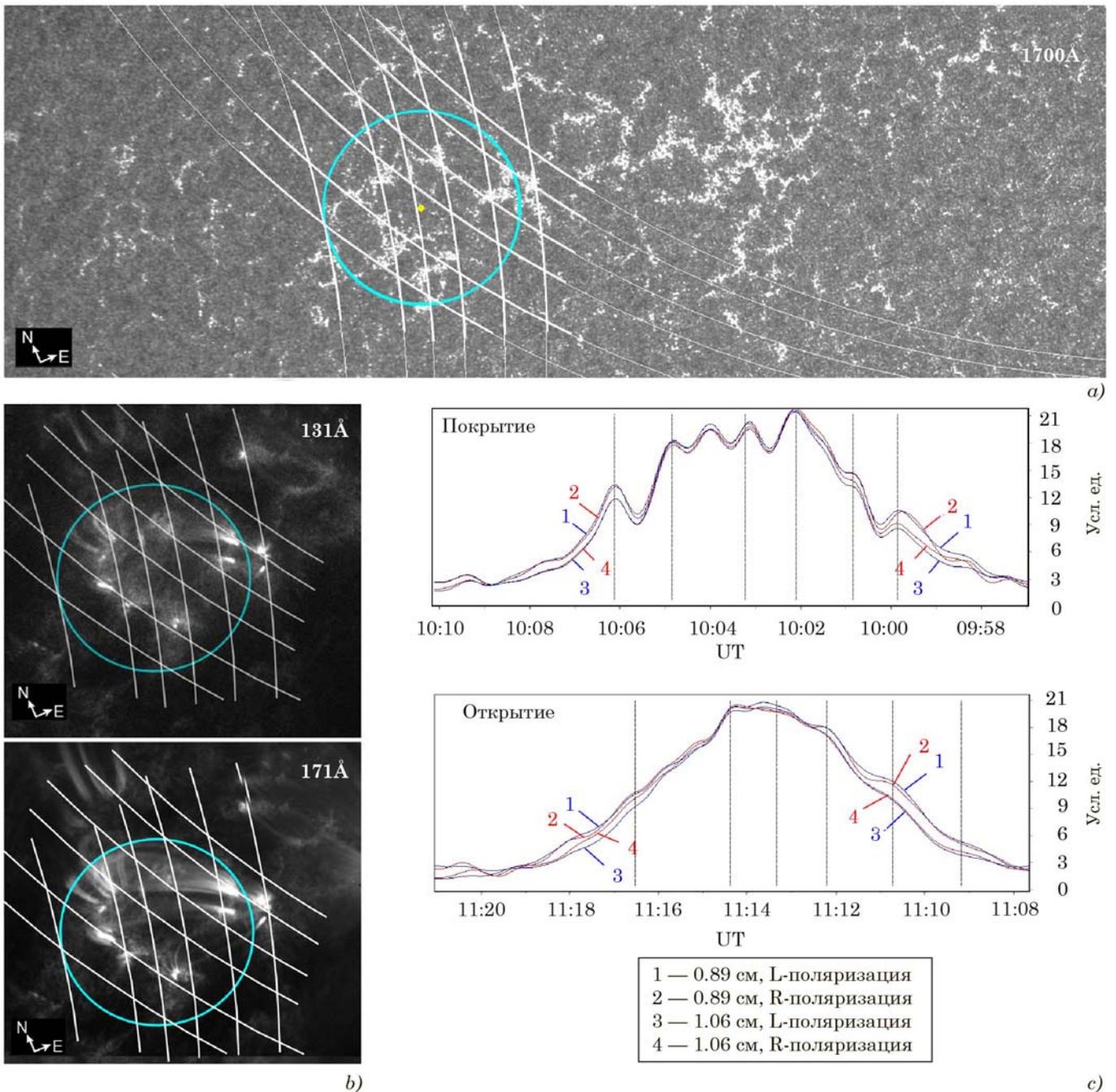


Рис. 9. Наблюдение радиогрануляции на затмении 2022 г. *a* — иллюстрация движения лимба Луны по области в процессе затмения, фон — изображение области в линии 1700Å (SDO/AIA); *b* — такие же изображения, но с фоновыми изображениями в линиях 131 и 171Å (SDO/AIA). Времена, соответствующие показанным лимбам Луны, отмечены на графиках вертикальными линиями. Голубая окружность показывает размер ДН; *c* — одномерные распределения яркости по беспятненной активной области по наблюдениям в Ка-диапазоне на РТ-13 в РАО «Светлое» в двух сечениях на покрытии и открытии области

## Радиогрануляция

По последним данным (Bogod et al., 2015), «радиогрануляция» — это проявление хромосферной сетки, наблюдаемой в радиодиапазоне с одномерным разрешением на антеннах переменного профиля (БПР и РАТАН-600) и выражающейся в виде накопительного эффекта (суммирование излучения в протяженной ДН размером порядка диаметра диска Солнца). По многолетним наблюдениям на РАТАН-600 эффект радиогрануляции устойчиво сохраняется в течение  $\pm 2$  ч и заметно меняет свою структуру через сутки. Согласно наблюдениям во время затмения, которые тоже являются одномерными, мелкомасштабная структура записи меняется быстрее — за промежуток между покрытием и открытием, если направления движения лунного края расположены под большим углом (рис. 9), что не противоречит результатам наблюдений на РАТАН-600.

Преимуществом затменных наблюдений радиогрануляции является обнаружение хорошей корреляции между наблюдениями на коротких и длинных волнах (3.5 см и 13 см). Это означает, что хромосферная сетка продолжается и на корональных высотах. Согласно наблюдениям на радио-

телескопах «Квазар-КВО» двух последних затмений, характер радиогрануляции одинаков как для участков спокойного Солнца, так и для районов приполярных корональных дыр.

## Измерение радиорadiusa Солнца

Для спокойного Солнца распределение радиояркости в микроволновом диапазоне можно представить как сумму трех компонент: равномерно светящегося диска с радиусом, превышающим оптический радиус Солнца (радиорadius), локального уярчения вблизи лимба и плавного уменьшения радиояркости с увеличением высоты в короне. Во время затмения каждая из компонент дает свой специфический вклад в наблюдаемую затменную кривую. Точное их разделение требует моделирования процесса затмения с учетом кривизны диска Солнца, размера и формы ДН, а также излучения Луны.

Измерение простых характеристик распределения радиояркости в прилимовой зоне — радиорadiusa и величины уярчения к краю — являются традиционными задачами исследований и считаются очень важными с точки зрения теории и моделей солнечной атмосферы. Оба этих параметра

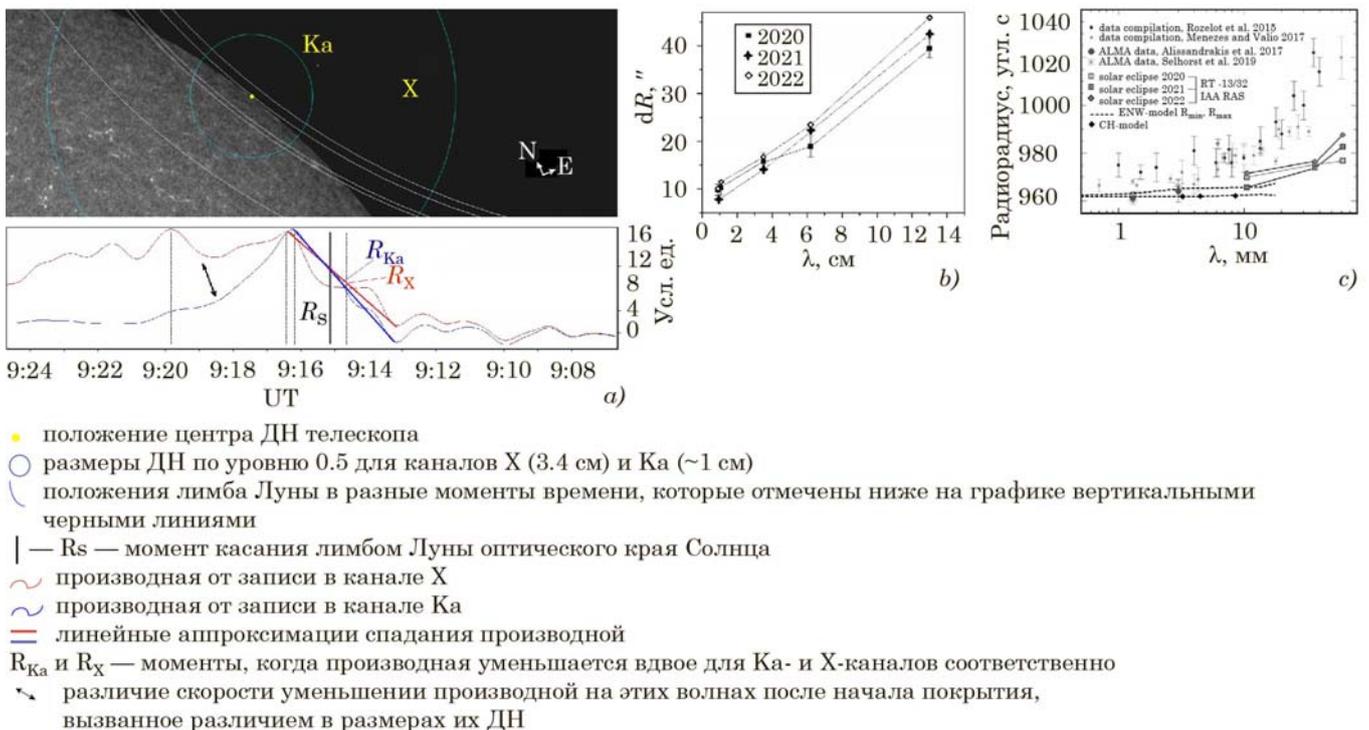


Рис. 10. *a* — пример измерения радиорadiusa по производной от затменной кривой в районе I контакта на радиотелескопе РТ-13 в РАО «Светлое» (затмение 2022 г.). На рисунке в качестве фона использовано изображение Солнца в линии 1700 Å (SDO/AIA); *b* — превышение радиорadiusa над оптическим радиусом диска Солнца ( $dR$  в угл. сек для стандартного размера Солнца — 960") по наблюдениям затмений 2020–2022 гг. в ИПА РАН; *c* — компиляция измерений радиорadiusa Солнца по литературным данным включая и наши измерения для мм- и см-диапазона волн, пунктирные линии на графике — ENW модели

определяются высотным распределением физических параметров в атмосфере Солнца и могут эффективно изучаться при наблюдении затмения в период I и IV контактов (рис. 10).

Измерение превышения радиорadiusа над радиусом Солнца в оптике производилось путем измерения разности моментов  $R_{ка}$ ,  $R_x$  (в том числе для других диапазонов волн) и  $R_s$  с последующим умножением на скорость движения края Луны по радиусу Солнца в точке контактов.

Выполненные измерения в затмениях 2020 г. и 2021 г. (Иванов, Рахимов, 2021; Топчило и др., 2022), когда активность Солнца была минимальной, показали, что превышение радиорadiusа над оптическим невелико. Оно значительно меньше, чем дают предыдущие измерения на различных инструментах (рис. 10с), и приближаются к оценкам, полученным по последним численным моделям для усиленной хромосферной сетки (ENW модели — пунктирные линии на графике, рис. 10с). Причина расхождения старых и новых измерений пока неясна.

В последнем затмении 2022 г. активность Солнца была повышенной (примерно середина фазы роста), но активность в районе I контакта, по которому измерялся радиорadius, была низкой и результаты измерений в пределах ошибок получились близкими к результатам затмений 2020 г. и 2021 г. Хотя некоторый тренд на повышение радиорadiusа с увеличением солнечной активности не исключен (рис. 10b) и необходимы дальнейшие исследования.

## Использование радиометра водяного пара

Радиометр водяного пара (РВП) — достаточно молодой инструмент. Основная его функция — измерение тропосферной задержки и поглощения в атмосфере Земли (Серов и др., 2015). После установки полноповоротной монтировки он приобрел все качества полноценного астрономического инструмента и с 2021 г. используется в наблюдениях солнечных затмений.

Основная проблема наблюдений затмения на РВП заключается в необходимости сохранения стабильности атмосферных характеристик в течение затмения, поскольку при ДН в 5–6 угл. град. Солнце для радиотелескопа является почти точечным источником и сигнал (антенная температура  $T_a(t)$ ) от него составляет менее 100°, а уровень солнечной активности в диапазоне 1 см очень низкий.

В начале затмения 2021 г. (l'in et al., 2022) появление легкой неоднородной облачности привело к возникновению значительных флуктуаций сигнала (до 30–40 % от полного потока диска Солнца) (рис. 11a). Но небольшое прояснение во второй половине затмения (11:30–11:50 UT) дало возможность вписать в нормированную затменную кривую ( $S(t) = T_a(t) / T_a$  вне затмения) кривую покрытия площадей (черная жирная кривая) и определить яркостную температуру Солнца ( $T_B$ ).

В затмении 2022 г. (Иванов и др., 2023), которое проходило при «идеальных» атмосферных условиях, затменные кривые визуально были

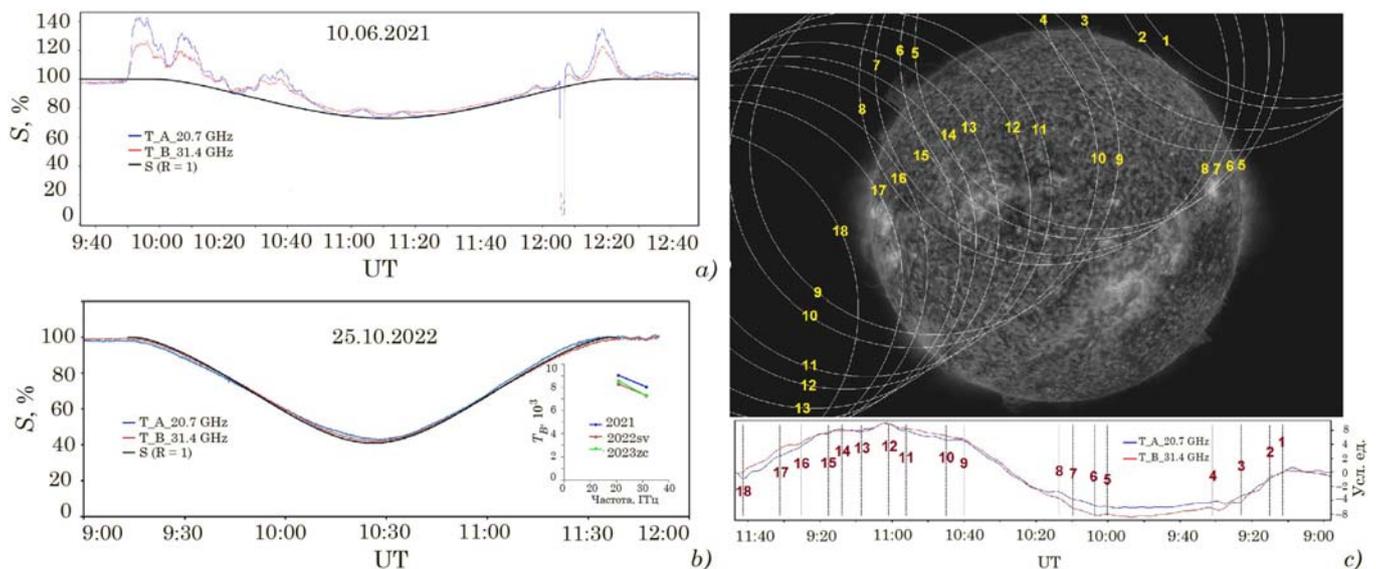


Рис. 11. Результаты наблюдения затмений на РВП-4 ИПА РАН: *a* — нормированные записи затменной кривой на РВП-4 в РАО «Светлое» на затмении 10.06.2021 г. и *b* — на затмении 25.10.2022 г., на встроенном графике представлены измеренные значения средних яркостных температур для обоих затмений; *c* — изображение Солнца в линии 304 Å (SDO/AIA) с нанесенными положениями лимбов Луны для моментов времени, отмеченных вертикальными линиями на графике (помечены числами от 1 до 18); на графике: производная от затменной кривой на затмении 25.10.2022 г. (усл. ед.)

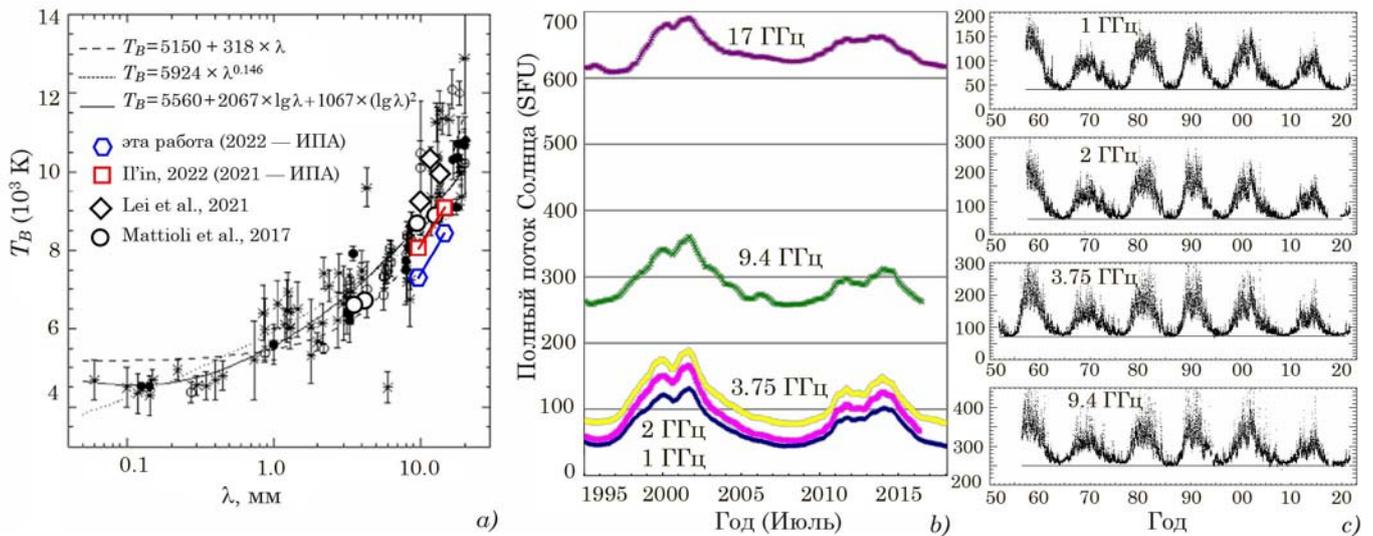


Рис. 12. *a* — архивные и современные значения яркостной температуры спокойного Солнца в миллиметровом диапазоне. Соединенными значками на графике отмечены наши результаты, полученные на РВП в 2021 г. и 2022 г.; *b* — результаты измерений полного потока Солнца на радиополяриметрах обсерватории Нобейама (<https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/>) в 23-м и 24-м солнечных циклах на 1–17 ГГц; *c* — полный поток Солнца в диапазоне 1–9.4 ГГц, полученный в обсерваториях Тоякава и Нобейама с 50-х годов по текущее время (6 солнечных циклов). На каждой частоте проведен минимальный фоновый уровень

абсолютно гладкими и близкими к кривой покрытия площадей в течение всего затмения (рис. 11*b*), что тоже позволило измерить яркостную температуру Солнца.

Расчет средней яркостной температуры Солнца  $T_B(f)$  ( $f$  — частота наблюдения) в предположении равномерно светящегося диска проводился по известной формуле:  $T_B = T_A \times \Omega_{\text{ант}} / \Omega_{\text{ист}}$ , где  $T_B$  и  $T_A$  — яркостная и антенная температуры источника (Солнца),  $\Omega_{\text{ант}}$  — телесный угол диаграммы направленности антенны (использовались характеристики РВП из табл. 1),  $\Omega_{\text{ист}}$  — телесный угол источника (диска Солнца). В пределах статистических ошибок оценки  $T_B(f)$  Солнца, полученные в 2021 г. и 2022 г., близки (рис. 12):

— для наблюдений 2021 г.:  $T_B(20.7) = 9060$  К,  $T_B(31.4) = 8050$  К,

— для наблюдений 2022 г.:  $T_B(20.7) = 8450$  К и  $T_B(31.4) = 7300$  К.

Измеренные яркостные температуры находятся на нижней границе графика яркостных температур, полученных другими авторами (рис. 12*a*). Зависимость полного потока (или яркостной температуры) от фазы солнечного цикла, аналогичная приведенной на рис. 12*b*, не получена из-за малого количества наблюдений.

Хорошее качество записи затменной кривой на затмении 25.10.2022 г. позволило также обнаружить в производных (рис. 11*c*) некоторое соответствие деталей кривой с наблюдаемыми солнечными источниками, в частности: восходящей активной областью NOAA 13131 и беспятенной обла-

стью (и/или высоким протуберанцем, одновременно покрывавшемся вблизи северного полюса Солнца) (Иванов и др., 2023).

### Локализация вспышечных событий

Изначально наблюдение затмений не предполагает регистрацию динамических событий, происходящих на Солнце. Это связано с тем, что сам процесс затмения является динамическим событием и наложение их друг на друга затрудняет взаимную интерпретацию.

При наблюдении затмения на одном телескопе край Луны проходит источник дважды в два существенно разнесенных момента времени (покрытие/открытие источника) с характерной разницей в половину длительности затмения (~1 ч). За это время вспышечный источник претерпевает существенные изменения, вплоть до его полного исчезновения. Длительность же самого прохождения источника зависит от размеров ДН телескопа. При характерном размере ДН ~2' время ее прохождения краем Луны составляет ~6<sup>m</sup>, что значительно превышает длительность импульсной фазы вспышки и порядка или меньше длительности вспышек типа медленный подъем/спад (10–100<sup>m</sup> и более). Таким образом импульсная фаза вспышки минутного масштаба в среднем прорисовывается полностью в течение прохождения ДН, однако точное место ее возникновения в пределах незакрытой части ДН не определено. Для медленной фазы вспышек из-за нестационарности источника излучения невозможно получить двумерное изображение. А для вариаций промежуточной продол-

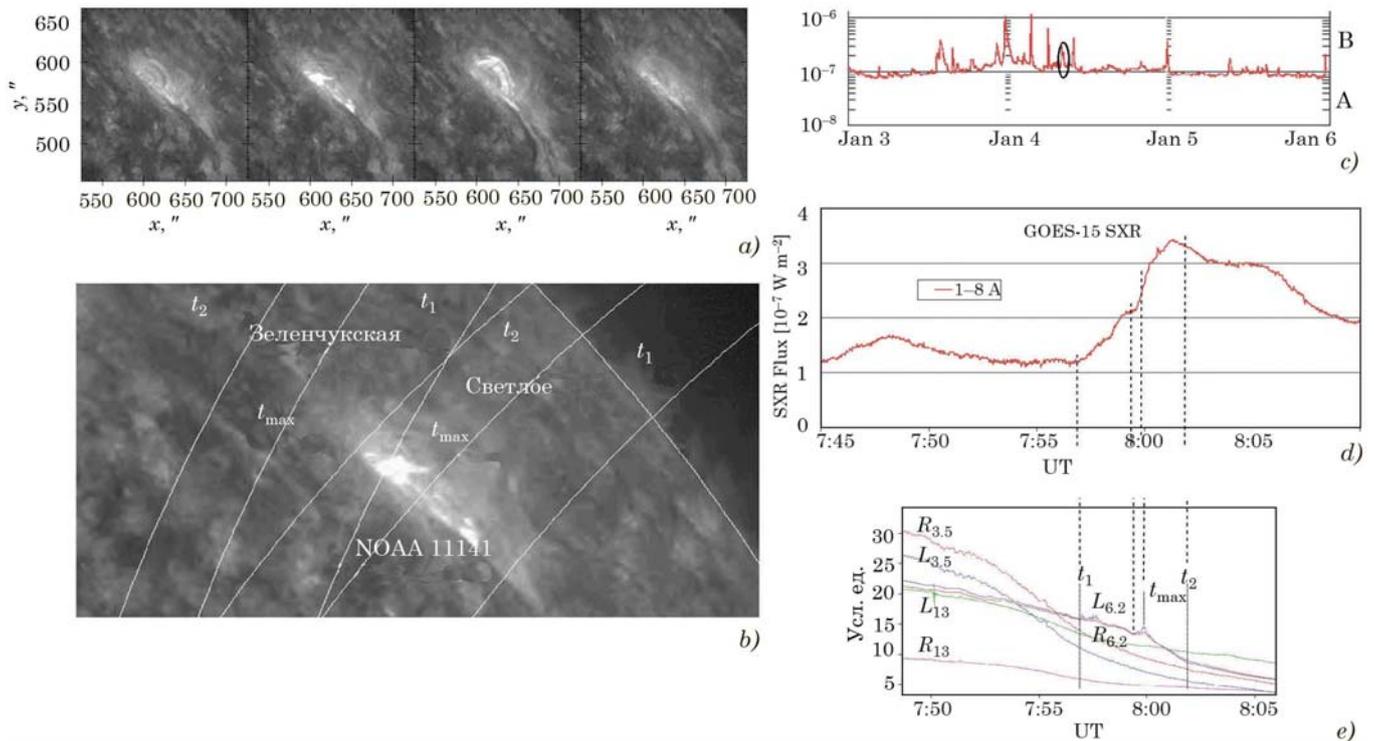


Рис. 13. Наблюдение вспышки в NOAA 11141 во время затмения 2011 г. (Финкельштейн и др., 2012): *a* — динамика вспышки в линии  $304 \text{ \AA}$  (SDO/AIA). Времена съятия снимков (слева — направо):  $7^{\text{h}}40^{\text{m}}08^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}00^{\text{m}}08^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}19^{\text{m}}44^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}40^{\text{m}}08^{\text{s}}$ ; *b* — на снимке в линии  $304 \text{ \AA}$  наложены положения лимбов Луны в моменты  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_{\text{max}}$  для обеих обсерваторий; *c* — на графике представлена вспышечная ситуация на Солнце по данным аппарата GOES-15 за 3–5.01.2011 г. Черным эллипсом отмечен период наблюдения затмения; *d* — показан увеличенный участок записи GOES, охватывающий период покрытия АО 11141; *e* — на графике показан профиль всплеска в АО 11141, наблюдавшегося в период покрытия этой АО на радиотелескопах РТ-32 в РАО «Светлое» (6.2 см) и РАО «Зеленчукская» (3.5 и 13 см). Приведены совмещенные по времени участки оригинальных затменных кривых. События:  $t_1$  и  $t_2$  — моменты начала и конца вспышечного события, как он виден РТ-32 в РАО «Светлое».  $t_{\text{max}}$  — момент максимума второго всплеска

жительности невозможно получить и одномерное изображение, поскольку невозможно отличить временное изменение принимаемого сигнала от изменений, связанных с эффектом прохождения ДН краем Луны.

Иная ситуация возникает при одновременном наблюдении на двух существенно разнесенных телескопах, когда в каждый момент времени для них закрываются/открываются разные участки источника. Это позволяет построить двумерную карту медленной фазы вспышки, а для импульсной фазы существенно сократить область неопределенности ее возникновения.

На рис. 13 представлен редчайший случай наблюдения профиля слабой вспышки балла 2В по данным спутника GOES-15, происшедшей во время затмения 2011 г. в АО 11141 в период ее покрытия в РАО «Светлое» (с  $t_1$  до  $t_2$ ). Начало радиовсплеска ( $t_1$ ) совпало с началом рентгеновской вспышки. В этот же период в РАО «Зеленчукская» вспышки не наблюдалось, что позволяет однозначно локализовать ее источник, как вспышечную петлю, видимую в УФ на рис. 13. При этом второй всплеск связан с левой частью петли, расположенной между лимбами  $t_{\text{max}}$  и  $t_2$  для РАО

«Светлое». В рентгене же в этот период наблюдалось дополнительное увеличение потока.

### Основные результаты

Представлен обзор исследований микроволнового излучения Солнца, выполненных с использованием затменного метода наблюдений на радиотелескопах «Квазар-КВО» за период в два 11-летних цикла солнечной активности (1999–2022 гг.).

Полученные результаты отсортированы по степени активности исследованных объектов и явлений.

1. Достигнуто предельно возможное значение эффективного углового разрешения в сантиметровом радиодиапазоне, определяемое дифракцией на краю Луны  $\sim 3$  угл. сек.

2. Измерена средняя яркостная температура спокойного Солнца в 2021–2022 гг. на волнах 0.89 см и 1.06 см. Значения температур, составившие соответственно  $7.7 \pm 0.3$  КК и  $8.8 \pm 0.3$  КК, находятся у нижней границы результатов измерений других авторов.

3. По производной от записей I и IV контактов на затмениях 2020–2022 гг. измерены значения радиорadiusа на волнах (0.89, 1.06, 3.5, 6.2, 13) см.

Величины радиорadiusа значительно меньше встречающихся в литературе и близки к значениям, полученным по современным 3D-расчетам атмосферы Солнца. Причины отмеченного расхождения пока не установлены.

4. Представлены наблюдения многочисленных мелкомасштабных уярчений на диске Солнца (радиогрануляция) в эпоху низкой солнечной активности (2020 г. и 2022 г.). Уярчения связаны с локальными усилениями магнитного поля — с хромосферной сеткой — и видны во всем наблюдаемом диапазоне — от 0.89 см до 13 см.

5. Выявлена тонкая структура ИЦМИ по результатам наблюдения правильного одиночного пятна в АО 11140 (затмение 2011 г.). Построена квазидвумерная модель распределения яркостной температуры по пятну, качественно согласующаяся с результатами теории циклотронного излучения при изменении луча зрения в дипольной модели магнитного поля пятна.

6. Показано, что высота ИЦМИ над солнечными пятнами (затмения 2011 г. и 2015 г.) невелика. По измерениям видимого смещения максимума радиоизлучения относительно центра пятна в оптике на затмении 2011 г. на волнах 3.5 см, 6.2 см и 13 см получены максимальные оценки высот (2.7–4.1, 8.3–9.7, 13) тыс. км соответственно. С учетом специфической формы ИЦМИ (определяется только путем моделирования) истинные значения высоты будут заметно меньше.

7. Измерены параметры мощного межпятенного источника радиоизлучения в АО 8662 (затмение 1999 г.), образованного совокупностью множества пор и обрывков теней, показавшего растущий в дециметры спектр с яркостной температурой до  $10^7$  К. Предложена модель источника излучения субрелятивистских электронов со степенным распределением по энергиям, находящихся в магнитном поле порядка 100–150 Гс.

8. На примере наблюдения слабой вспышки в АО 11141 (затмение 2011 г.) продемонстрирована возможность отождествления соответствующего ей источника флуктуирующего излучения за счет наблюдения затмения в близкие моменты времени из двух географически удаленных обсерваторий.

## Заключение

Показана целесообразность сочетания использования радиотелескопов «Квазар-КВО» для наблюдений прикладного характера с параллельными фундаментальными исследованиями физики источников космического излучения.

Наш 23-летний опыт использования радиотелескопов РСДБ-комплекса ИПА РАН «Квазар-КВО» для наблюдения солнечных затмений показывает, что они как поодиночке, так и в составе единого комплекса разнородных инструментов могут эф-

фективно использоваться для наблюдения различных солнечных образований на диске и в прилимовой зоне Солнца, а также стать важным дополнением существующих радиогелиографов. Для повышения качества проведения наблюдений солнечных затмений и повышения результативности их последующей обработки рекомендуется сопровождать их внезатменными наблюдениями Солнца до и после затмения в течение нескольких дней на тех же инструментах с использованием новых методик (Топчило, 1983). Желательно также, наряду с наблюдениями затмений, являющихся эпизодическими, перейти к более регулярным внезатменным наблюдениям слабо изученных солнечных структур, например прилимовой зоны. Это особенно важно в связи предстоящим, достаточно долгим, отсутствием подходящих затмений на территории России.

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

## Литература

- Ахмедов Ш. Б., Ипатов И. А., 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.
- Богод В. М., Яснов Л. В. О вертикальной структуре магнитного поля в активных областях Солнца на корональных высотах // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 318–322.
- Богод В. М., Яснов Л. В. О сопоставлении радиоастрономических измерений высотной структуры магнитного поля с данными модельных приближений // Астрон. бюлл. 2009. Т. 64, № 4. С. 390–403.
- Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Результаты наблюдений солнечного затмения 20 мая 1966 г. на волне 4 см // в сборнике Радиоастрономические наблюдения солнечного затмения 20 мая 1966 г. М.: изд. Наука, 1972. С. 127–129.
- Гельфрейх Г. Б., Лубышев Б. И. О структуре локальных источников S-компоненты радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1979. Т. 56. Вып.3. С. 562–573.
- 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 «Бада-ры» // Труды XXV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2021», 4–8 октября 2021 г., ГАО РАН. СПб.: Пулковская обсерватория, 2021. С. 143–146. doi: 10.31725/0552-5829-2021-143-146.
- Иванов Д. В., Рахимов И. А., Дьяков А. А. и др. Солнечное затмение 21.06.2020 г. по наблюдениям на радиотелескопах ИПА РАН (первые результаты) // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 22–31. URL: <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.56.22-31> (дата обращения 15.03.2023).
- Иванов Д. В., Рахимов И. А., Дьяков А. А. и др. Наблюдение солнечного затмения 25.10.2022 г. на радиотелескопах ИПА РАН (первые результаты) // Геомагн. аэрон. 2023 (в печати).

Молчанов А. П., Чень Фан-юнь, Ван Шоу-гуань и др. Предварительные результаты наблюдений кольцеобразного затмения солнца 19 апреля 1958 г. // Ради-астрономия. Парижский симпозиум. 1958. С. 172–173.

Петерова Н. Г., Топчило Н. А. Эффект Гельфрейха-Лубышева по наблюдениям солнечных пятен на микро-волнах // Астроф. бюлл. 2016. Т. 71, №. 2. С. 251–260.

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.

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) // Тру-ды XXIV Всероссийской ежегодной конференции по фи-зике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2020», Октябрь 2020 г., ГАО РАН. СПб.: Пулковская обсерватория, 2020. С. 261–264. doi: 10.31725/0552-5829-2020-261-264.

Серов Е., Кошелев М., Вилков И. и др. Исследова-ние спектра поглощения микроволн атмосферным во-дяным паром для задач дистанционного зондирования окружающей среды // ИКИ РАН. Шестая междунаро-дная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли», г. Таруса. 02–06.03.2015. URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/tarusa2015/19.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2015/19.pdf) (дата обращения 15.03.2023).

Топчило Н. А. Автоматизированные наблюдения Солнца. II. Методы наблюдений // Вестник ЛГУ. 1983. № 1. С. 99–110.

Топчило Н. А., Петерова Н. Г., Рахимов И. А., Нагнибеда В. Г. Наблюдение солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН в минимуме солнечного цикла // «Наука СПбГУ — 2021», Сборник материалов Всероссийской конференции по естественным и гумани-

тарным наукам с международным участием, 28 декабря 2021 г. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2022. С. 331–334.

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 «Зелен-чукская»): первые результаты // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 25. С. 154–159.

Финкельштейн А. М., Топчило Н. А., Петерова Н. Г. и др. Предварительные результаты наблюдений сол-нечного 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.

Хайкин С. Э., Чухачев Б. М. // ДАН СССР. 1947. 58, № 9, С. 1923.

Arsaeu I. E., Bykov V. Yu., Il'in G. N., Yurchuk E. F. Water vapor radiometer: measuring instrument of atmos-pheric brightness temperature // Measurement Tech-niques. 2017. Vol. 60. Iss. 5. P. 497–504. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-017-1224-1> (дата обращения 15.03.2023).

Bogod V. M., Alissandrakis C. E., Kaltman T. I., Tok- hchukova S. K. RATAN-600 observations of small-scale structures with high spectral resolution // Solar Phys. 2015. Vol. 290. P. 7–20.

Il'in G. N., Bykov V. Yu., Peterova N. G., Topchilo N. A. Observation of the solar eclipse on June 10, 2021 on the water vapor radiometer of the institute of applied astron-omy, Russian Academy of Sciences // Geomagn. Aeron. 2022. Vol. 62, Suppl. 1. P. S96–S102. URL: <https://doi.org/10.1134/S0016793222600643> (дата обращения 15.03.2023).

Korzavin A. N., Peterova N. G., Topchilo N. A. Ring- shaped cyclotron radiation source on the example of the NOAA 11140 active region according to high angular reso- lution observations // Geomagn. aeron. 2012. Vol. 52. No. 7. P. 867–874. URL: <https://doi.org/10.1134/S0016793212070079> (дата обращения 15.03.2023).