

Круговое сканирование прилибмовой зоны Солнца по наблюдениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА РАН. Метод и первые результаты

© И. А. Рахимов¹, Т. С. Андреева¹, А. Г. Михайлов¹, Н. А. Топчило², Н. Г. Петерова³

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

³САО РАН, Нижний Архыз, Россия

Реферат

Наблюдения за лимбовой зоной Солнца имеют особое значение для изучения атмосферы Солнца, поскольку дают информацию о ее высотной структуре. Однако изучение наблюдаемых нестационарных трехмерных структур в этой зоне сопряжено со значительными трудностями из-за сильного градиента общей яркости по высоте. Метод растрового картирования, обычно используемый в радионаблюдениях, приводит к большим ошибкам при идентификации источников на лимбе Солнца. Целью данной работы является демонстрация возможности повышения точности лимбовых наблюдений на существующих больших полноповоротных антеннах, в частности РТ-32 в ИПА РАН, а также выбора эффективно наблюдаемых объектов и явлений в его рабочем диапазоне частот.

Для решения этой задачи было предложено использовать метод наблюдений, называемый круговым сканированием, при котором диаграмма направленности телескопа совершает круговые движения относительно центра солнечного диска. Данный метод был разработан ранее для наблюдений Солнца с помощью радиотелескопов, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн с характерным размером диаграммы направленности в несколько угловых минут, для устранения ошибок, связанных с дефектами движения телескопа и нестабильностью атмосферы. На данном этапе работы на РТ-32 был использован более простой в реализации, но менее эффективный дискретный вариант кругового сканирования — квазикруговое сканирование. В этом режиме телескоп последовательно отслеживает ряд точек, расположенных равномерно по окружности относительно центра солнечного диска.

В статье представлены первые результаты тестовых наблюдений на РТ-32 в обсерватории «Светлое» на длине волны 3.5 см в период с апреля 2024 г. по февраль 2025 г. Показано, что при ширине диаграммы направленности РТ-32 в 4 угл. мин отдельные детали активных областей легко идентифицируются во всей зоне лимба, что весьма проблематично, например, для радиотелескопов типа РАТАН-600. Радиотелескоп РТ-32 также успешно обнаруживает слабые, но достаточно крупные источники над солнечным лимбом (типа протуберанцев и петельных структур). На примере наблюдения 15 апреля 2025 г. показано, что в перспективе реализация стандартного кругового сканирования позволит существенно ускорить процесс картографирования. Внедрение методики во всех трех обсерваториях ИПА РАН позволит осуществлять практически непрерывный мониторинг солнечной активности в прилибмовой зоне.

Ключевые слова: радиотелескоп, радиокарта, активная область, протуберанец, выброс корональной массы, радиорадиус Солнца, поляризация радиоизлучения, магнитное поле.

Контакты для связи: Рахимов Исмаил Ахмедович (rahimov@iaaras.ru), Топчило Николай Андреевич (topchilona@yandex.ru).

Для цитирования: Рахимов И. А., Андреева Т. С., Михайлов А. Г., Топчило Н. А., Петерова Н. Г. Круговое сканирование прилибмовой зоны Солнца по наблюдениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА РАН. Метод и первые результаты // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 73. С. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.73.3-10>

Circular Scanning of the Solar Limb Zone from Observations with the RT-32 Radio Telescope of IAA RAS. Method and First Results

I. A. Rakhimov¹, T. S. Andreeva¹, A. G. Mikhailov¹, N. A. Topchilo², N. G. Peterova³

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

²Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³St. Petersburg branch of Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Science, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Observations of the solar limb zone are of particular importance for studying the Sun's atmosphere as they provide information about its height structure. However, investigating observed non-stationary three-dimensional structures in this zone encounters significant difficulties due to the presence of a strong overall brightness height gradient. The raster

mapping method commonly used in radio observations leads to substantial errors when identifying sources at the solar limb. The aim of this work is to demonstrate the possibility of improving the accuracy of limb observations on existing large fully-steerable antennas, in particular the RT-32 at IAA RAS, and to select effectively observable objects and phenomena within its operating frequency range.

To do that, we propose using an observation method called circular scanning, where the telescope's beam pattern carries out circular movements relative to the center of the solar disk. This method was previously developed for solar observations using radio telescopes operating in the millimeter wavelength range with the beam size of several arcminutes, to eliminate errors caused by telescope motion defects and atmospheric instability. At this stage of the work on RT-32, quasi-circular scanning was used as the discrete version of circular scanning that is simpler to implement but less effective. In this mode, the telescope sequentially tracks a series of points uniformly distributed along a circle relative to the center of the solar disk.

The paper presents the first results of test observations with RT-32 at the Svetloe observatory at a wavelength of 3.5 cm during the period from April 2024 to February 2025. It is shown that, with RT-32's beamwidth of 4 arcminutes, individual details of active regions are easily identifiable across the entire limb zone, which is highly problematic, for example, for RATAN-600 type radio telescopes. The RT-32 radio telescope also successfully detects weak but sufficiently large-scale sources above the solar limb (such as prominences and loop structures). Using the observation from April 15, 2025, as an example, it is demonstrated that future implementation of standard circular scanning will significantly speed up the mapping process. Implementing the methodology at all three IAA RAS observatories will enable practically continuous monitoring of solar activity in the limb zone.

Keywords: radio telescope, radio map, active region, prominence, coronal mass ejection, radio radius of the Sun, polarization of radio emission, magnetic field.

Contacts: Ismail A. Rakhimov (rahimov@iaaras.ru), Nikolay A. Topchilo (topchilona@yandex.ru).

For citation: Rakhimov I. A., Andreeva T. S., Mikhailov A. G., Topchilo N. A., Peterova N. G. Circular scanning of the solar limb zone from observations with the RT-32 radio telescope of IAA RAS. Method and first results // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 73. P. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.73.3-10>

Введение

Наблюдения прилиम्бовой зоны имеют особое значение для исследований атмосферы Солнца, поскольку дают информацию о ее высотной структуре. Наблюдаемые на микроволнах хромосфера, переходная область и нижняя корона содержат большое количество нестационарных 3-мерных структур разных типов и размеров, трудности изучения которых значительно увеличиваются в этой зоне из-за наличия сильного общего высотного градиента яркости. В результате, обычно используемый в радионаблюдениях метод растрового картографирования при выделении источников на лимбе Солнца приводит к большим ошибкам. Повышение точности прилиम्бовых наблюдений на существующих крупных полноповоротных антеннах, в частности на РТ-32 ИПА РАН, представляет собой важную техническую задачу. Одним из достаточно простых способов ее решения является использование при наблюдениях метода кругового сканирования.

Идея метода кругового сканирования была предложена А. П. Молчановым в работе ([Молчанов, 1960](#)), где приведена схема его реализации, особенностью которой является устройство, смонтированное в фокусе зеркала. С его помощью осуществляется вращательное движение диаграммы направленности (ДН), в то время как телескоп следит за центром диска Солнца. Модернизация такого рода для действующих телескопов, особенно таких крупных как РТ-32, затруднительна.

Предпочтительнее другой способ ([Топчило, 1983](#)), когда все необходимые действия по перемещению ДН в нужном направлении по заданной программе выполняет поворотное устройство самого телескопа. Такой способ универсален для реализации любого типа движения. При наличии больших различий в характерном размере лимбовых источников и масштабе фоновой компоненты, этот способ позволил их разделить и успешно измерять характеристики прилиम्бовых источников даже в условиях сильного изменения атмосферного поглощения и значительных неточностей в движении телескопа.

Из числа крупных инструментов впервые этот метод был использован на радиотелескопах РТ-22 ФИАН и РТ-22 КрАО. С их помощью в 80–90-х годах проводились наблюдения солнечных протуберанцев за лимбом Солнца и волокон на диске в прилиम्бовых областях на волнах 8 мм и 1.35 см. Оценки точности измерения интенсивности радиоизлучения составили ~1 % от уровня спокойного Солнца и 0.01 % в круговой поляризации. Были определены их положение, размеры вдоль лимба и высоты, измерено магнитное поле. Отмечены случаи наблюдений подъема и разрушения протуберанцев, а также выбросов корональной массы (СМЕ). Измерены значения радиорайдиуса Солнца.

Подобные методы много лет использовались так же для картографирования Солнца на радиотелескопах РТ-7.5 МГТУ им. Баумана на волнах 3.4 и 2.5 мм ([Топчило, 2023](#)).

Таблица

Технические параметры штатной приемной аппаратуры на радиотелескопах ИПА РАН в настоящее время

РТ-32			РТ-13		
Диапазон частот, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, угл. мин	Диапазон частот, ГГц	Длина волны, см	Ширина ДН, угл. мин
S: 2.15–2.5	13	14.6	S: 2.2–2.4	13	34
C: 4.6–5.1	6.2	6.6	X: 8.0–8.5	3.6	9
X: 8.18–9.08	3.5	3.94	Ka (Ka2): 28–28.5	1.06	2.7
			Ka (Ka3): 33.5–34.0	0.89	2.3

Подобные наблюдения желательно продолжить и на более современных инструментах, и в более широком диапазоне длин волн, как для исследования структуры атмосферы Солнца, так и изучения космической погоды.

Наблюдения Солнца в ИПА РАН

Изначально радиоастрономический РСДБ-комплекс «Квазар-КВО» ИПА РАН был предназначен для решения навигационных задач. Однако его технические характеристики (см. таблицу) оказались очень подходящими и для проведения исследований микроволнового излучения Солнца.

Методика прилибмовых наблюдений Солнца на РТ-32

В отличие от затменных наблюдений Солнца (Иванов, 2023), которые широко применяются в ИПА РАН и основаны на слежении за источниками, более сложные режимы, связанные со сканированием объекта наблюдения, регулярно не использовались, поскольку не были реализованы в программном обеспечении центрального управляющего компьютера радиотелескопа (Михайлов, 2005). Точнее, реализованы в координатной системе азимут — высота, что очень неудобно для солнечных наблюдений.

Для эффективного наблюдения солнечных объектов и последующей их обработки требуется разработка дополнительного программного обеспечения, позволяющего работать непосредственно в координатах, привязанных к диску Солнца. Для объектов, расположенных в центральной части диска Солнца, это прямоугольная координатная система в картинной плоскости с центром в центре солнечного диска и осью ординат, направленной к северному полюсу Солнца. А для объектов, расположенных достаточно близко к лимбу, оптимальной является полярная система координат, связанная с вышеупомянутой прямоугольной системой.

Работа по освоению солнечной координатной системы и внедрению новых режимов сканирования, оптимальных для солнечных наблюдений,

была начата с освоения кругового сканирования. Для ускорения работы было предложено использовать вначале дискретный вариант кругового сканирования — квазикруговое сканирование, когда телескоп последовательно отслеживает ряд точек, расположенных равномерно по окружности относительно центра диска Солнца. Математически это соответствует замене непрерывной функции, каковой является скан, набором небольшого числа точек, отстоящих друг от друга не далее, чем положено по теореме Найквиста. В таком виде круговое сканирование совместимо с любым типом матобеспечения и не требует никакого дополнительного программирования.

На начальном этапе работы квазикруговое сканирование использовалось для проведения предварительных пробных наблюдений с целью определения доступных для наблюдения типов объектов и точности их измерения.

К настоящему времени тестовые наблюдения проведены в течение 8 дней в марте – мае 2024 г. и 3 дней в январе – феврале 2025 г. в обсерватории «Светлое» на длине волны 3.5 см. Полученные сканы за все дни наблюдений, нормированные к уровню спокойного Солнца, представлены на рис. 1. Приведенные сканы демонстрируют, что заметная активность наблюдается не только на диске Солнца, но и далеко за его лимбом.

Для удобства представления сканирование происходит против часовой стрелки начиная с направления на южный полюс Солнца ($\varphi = -90^\circ$) и там же заканчивая ($\varphi = +270^\circ$), образуя полный круг. При этом направление на северный полюс ($\varphi = +90^\circ$) находится в середине записи, а зоны активности располагаются в левой и правой частях записи.

Все записи нормируются к уровню спокойного Солнца, который выбирается по сигналу от центра солнечного диска с корректировкой на наличие там определенной активности, определяемой после построения карты, и выражаются в процентах. Погрешности для сканов в районе солнечного лимба составляют не более 2 %.

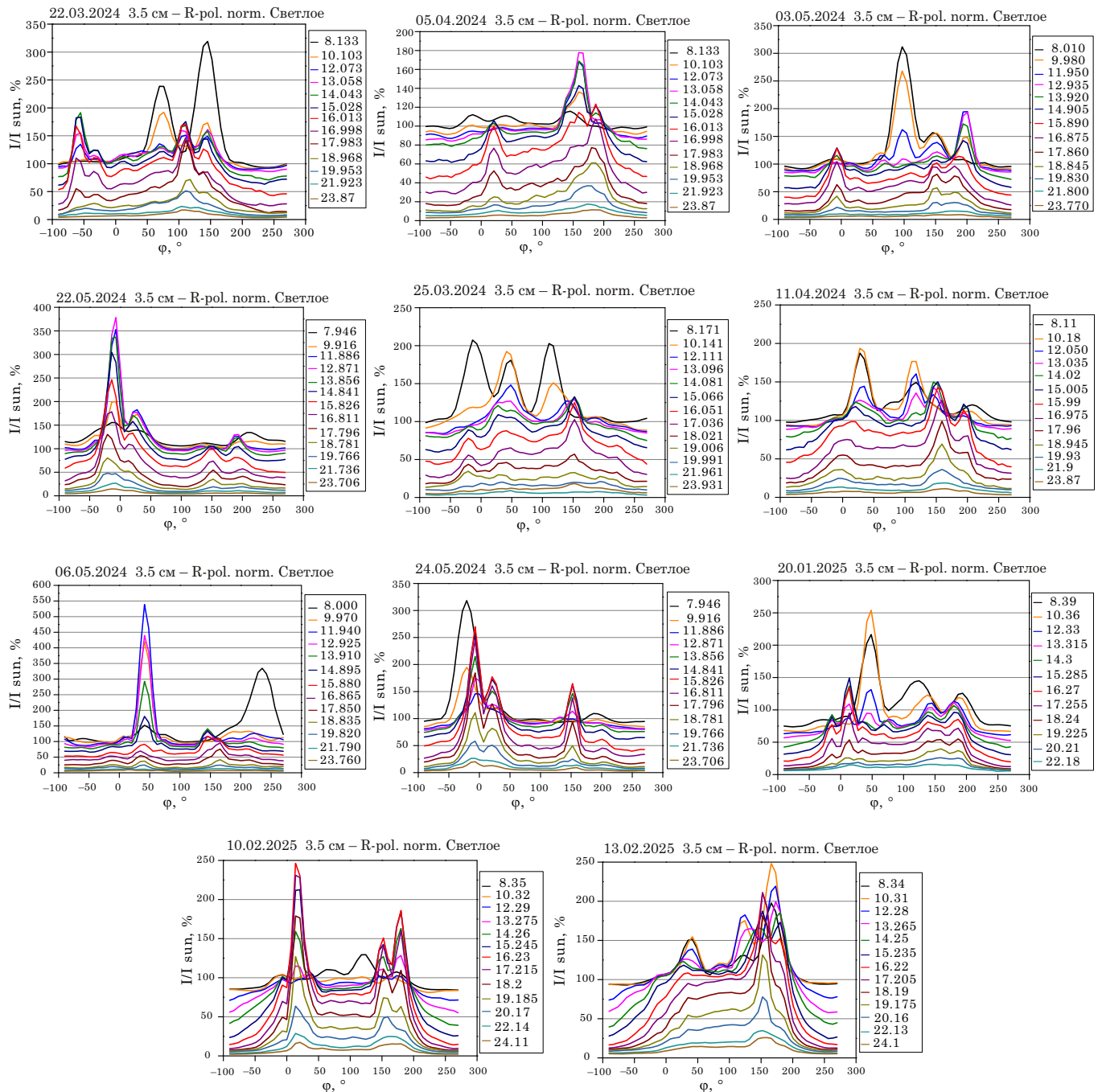


Рис. 1. Примеры полных круговых сканов в диапазоне радиусов 8–23 угл. мин, полученные в апреле – мае 2024 г. и январе – феврале 2025 г. на РТ-32 в обсерватории «Светлое» на длине волны 3.5 см

Для построения карты прилимовой области с учетом фоновой зоны использованы сканы с радиусами сканирования в диапазоне ~8–24' (13 сканов) с удалением крупномасштабной фоновой составляющей (уровня спокойного Солнца) для каждого скана. В отдельных случаях снимались карты всего Солнца.

На картах, представленных ниже (рис. 2–5), цветом показаны нормированные интенсивности излучения в процентах к уровню спокойного Солнца. Справа от карты показана шкала соответствия цвет — интенсивность. Слева — шкала расстоя-

ний на карте в угловых минутах. Центр диска Солнца находится в центре карты. Черная окружность показывает положение оптического лимба Солнца. Цифры, расположенные по краю карты, показывают углы вдоль круговых сканов (соответствуют углам ϕ из рис. 1).

В отличие от наблюдений на коротких волнах, где активность Солнца невелика по амплитуде и локальна по положению, наблюдения на 3.5 см показывают, что в настоящий период локальные источники занимают большую часть диска Солнца и их амплитуда сравнима или превышает ампли-

туду записи спокойного Солнца. Чтобы при удалении крупномасштабной фоновой составляющей не исказить сильно характеристики локальных источников, в качестве модели удаляемого фона для кругового скана использовалась константа + синусоида с периодом равным длине кругового скана.

Полученные карты сопоставлялись с изображением Солнца в других диапазонах длин волн (УФ, H α , Ca и др.) и на других инструментах (SPG (Алтынцева, 2020), ПАТАН-600, SDO и др.) и показали взаимное соответствие отдельных структурных деталей изображений в разных диапазонах. Для сравнения использовались изображения максимально близкие ко времени съема карт на РТ-32.

Результаты наблюдений

Поскольку наши наблюдения выполнялись вне рамок плановых работ, проводимых на радиотелескопе, обстановка на Солнце была заранее неизвестна, и наблюдаемые объекты часто оказывались тяжелыми для численной обработки. Поэтому в тестовых наблюдениях мы ограничились минимальной обработкой – получением качественных характеристик обнаруженных объектов. На рис. 2–5 представлены примеры наиболее интересных результатов исследований отдельных типов солнечной активности.

Первый из них, приведенный на рис. 2, — крупный холодный протуберанец, встретившийся в наблюдениях данного периода один раз. В дальнейшем наиболее ценным для такого типа наблюдений будет являться измерение магнитного поля.

Второй случай представлен на рис. 3, где на обоих Е- и W-лимбах Солнца наблюдаются два источника, идентифицированные как конгломерат из высоких и низких петель. Часть петель имеет вспыхивающую природу.

Образец явного проявления вспыхивающего процесса в виде образования и затухания высокой вспыхивающей петли продемонстрирован на рис. 4. Выявлена двухкомпонентная структура источника радиоизлучения и временные изменения в ней. Для эффективного исследования динамики таких объектов требуется организация регистрации миникарт источника излучения.

На рис. 5 представлены результаты длительных (в течение 4 часов) наблюдений процесса восхода источника на восточном краю Солнца. Для таких исследований на РТ-32 достаточно регистрация полных карт Солнца, но в течение длительного времени, желательно на нескольких телескопах.

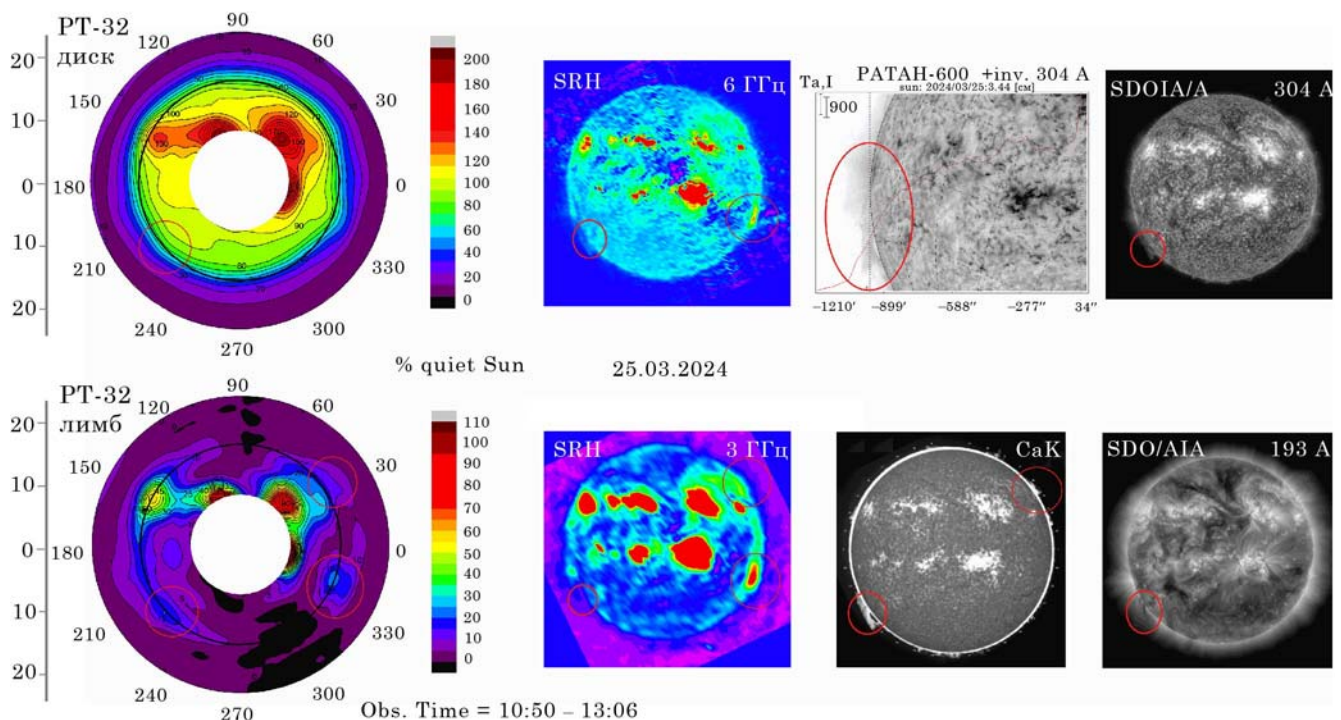


Рис. 2. Низкий длинный протуберанец (выделен красным в нижней части изображения слева), 25.03.2024

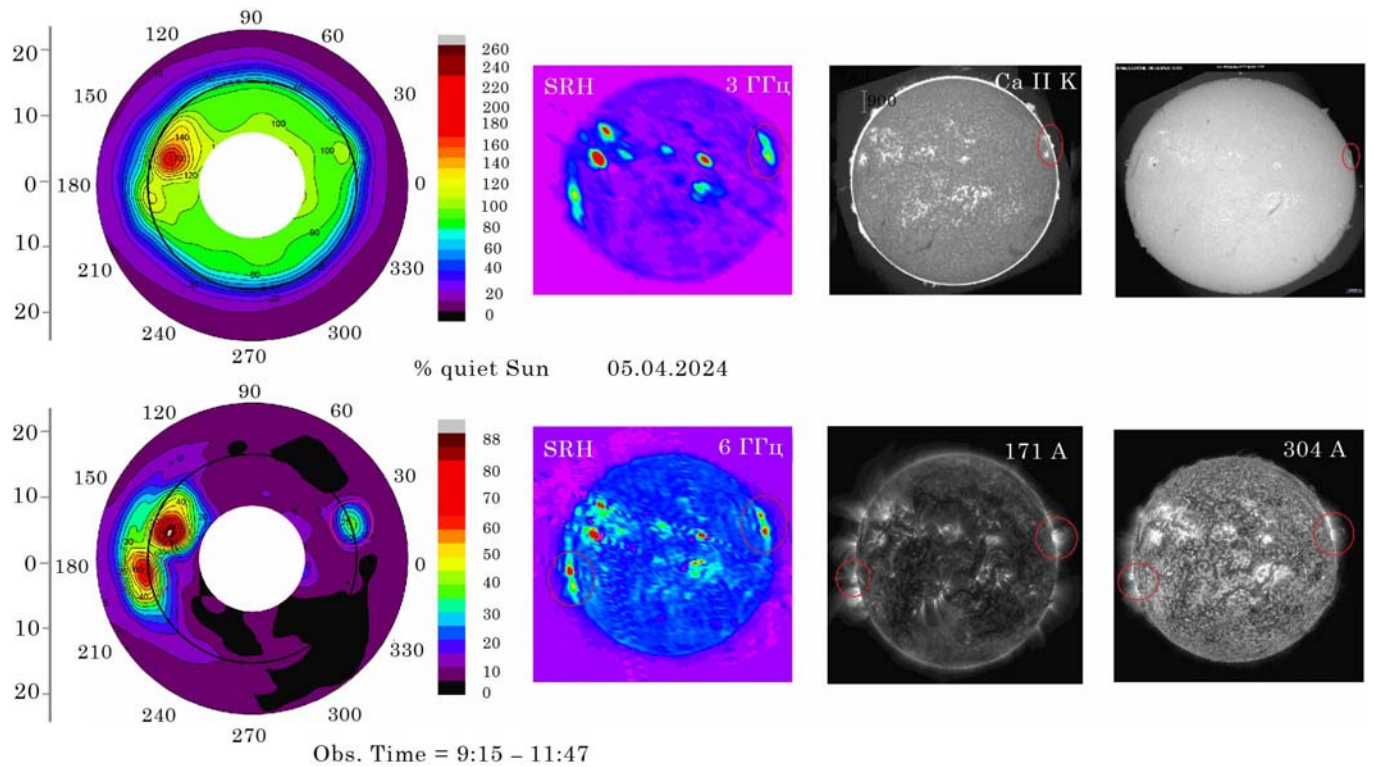


Рис. 3. Низкие «вспышечные» петли, 05.04.2024

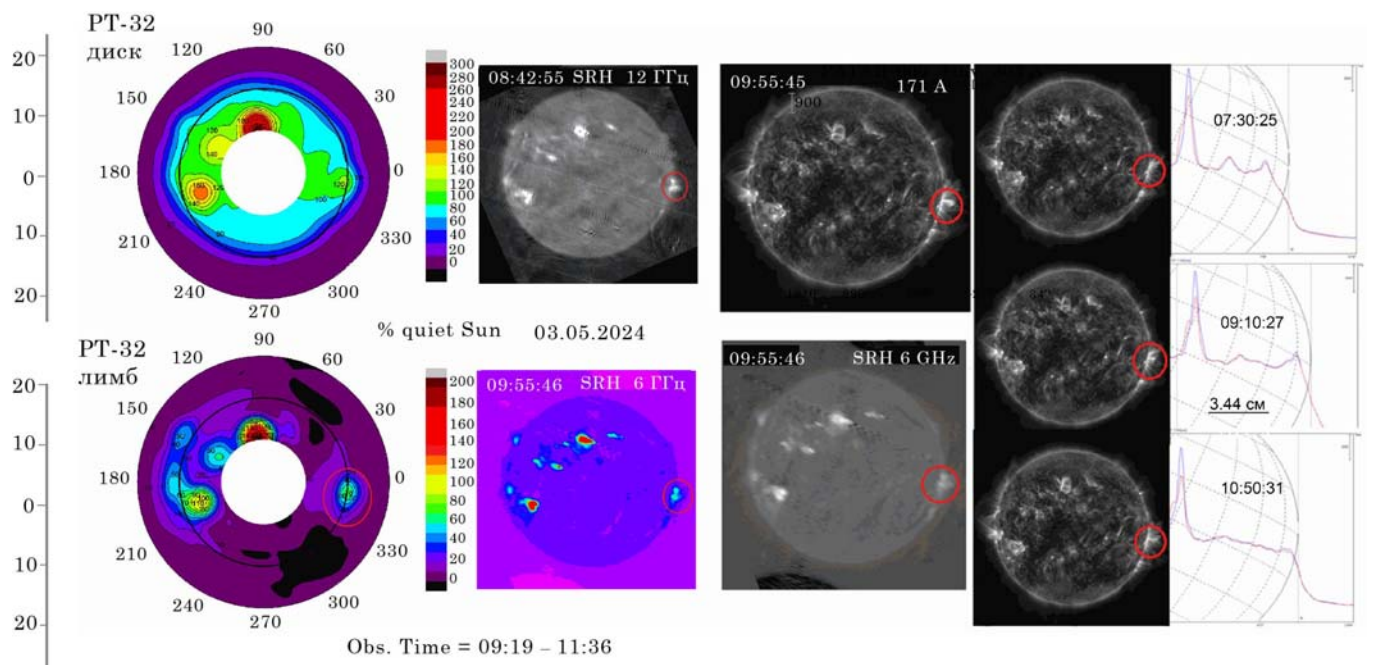


Рис. 4. Динамичная вспышечная петля, 03.05.2024

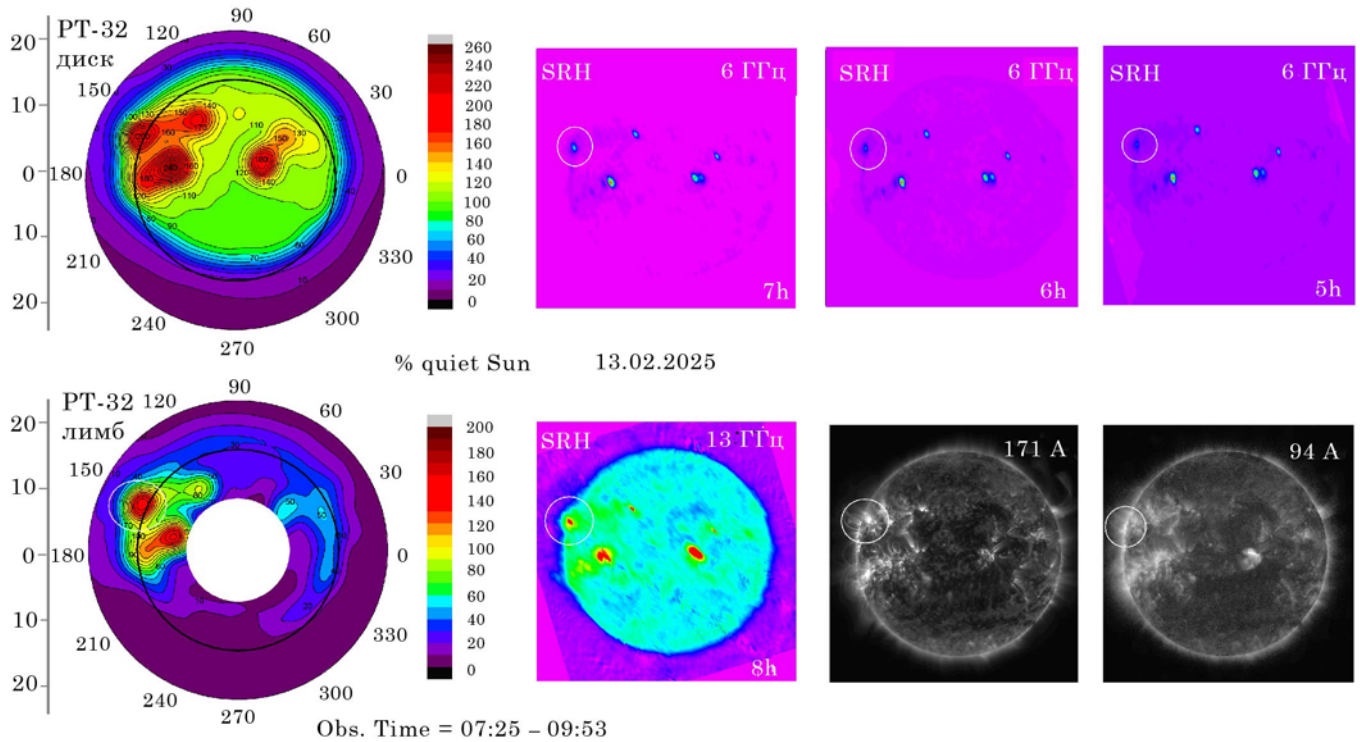


Рис. 5. Восход активной области из-за края Солнца, 13.02.2025.

Дискуссия

Наблюдения прошлых лет на крупных одиночных антеннах с ДН $\sim 2'$ в миллиметровом диапазоне волн показали (Топчило, 2023), что основными наиболее контрастными объектами на диске Солнца являются активные области с относительной амплитудой I/I_{sun} до $\sim 10\%$, а на лимбе протуберанцы с относительной амплитудой I/I_{sun} — до нескольких десятков процентов. Примененные методы кругового сканирования идеальны для выделения объектов в лимбовой зоне. С увеличением длины волны ситуация меняется — излучение от активных областей значительно возрастает, особенно в деталях с сильным магнитным полем (солнечные пятна). И за счет более широкой ДН активные области сливаются в широкие полосы, анализ которых пока не производился. Приводимые рисунки являются простой наглядной иллюстрацией возможностей радиотелескопов РТ-32 ИПА РАН.

Для повышения эффективности дальнейших наблюдений требуется уменьшение времени полного картографирования Солнца путем программной реализации стандартного кругового сканирования и повышение временного разрешения при наблюдениях отдельных объектов путем их локального картографирования. Первый пример реализации стандартного кругового сканирования на РТ-32 приведен на рис. 6. Из записей видно значительное уменьшение длительности сканирования (с 25 минут до 8 минут) при переходе от квазикругового сканирования к стандартному

сканированию и значительное увеличение числа отсчетов на скане (с 204 до 480).

Кроме реализации кругового сканирования желательно также увеличение продолжительности солнечных наблюдений с целью повышения вероятности регистрации объектов большего углового размера, на которых широкая ДН телескопа будет сказываться не так сильно. При необходимости дальнейшего значительного увеличения быстродействия круговое сканирование может быть реализовано также и инструментальным путем, например, за счет модернизации контррефлектора (Молчанов, 1960).

Заключение

Наблюдения с помощью крупных одиночных антенн, безусловно, проигрывают в угловом разрешении интерферометрическим наблюдениям, однако они имеют и свои преимущества, позволяющие проводить:

- прямое измерение высот/размеров стационарных корональных объектов по наблюдениям их положения на лимбе Солнца;
- наблюдение протуберанцев и измерение их магнитного поля;
- наблюдения динамики послевспышечного состояния области краевой или окололимбовой вспышки;
- наблюдение CME в нижней короне, недоступное наблюдениям на LASCO;
- регулярные измерения радиорadiusа Солнца.

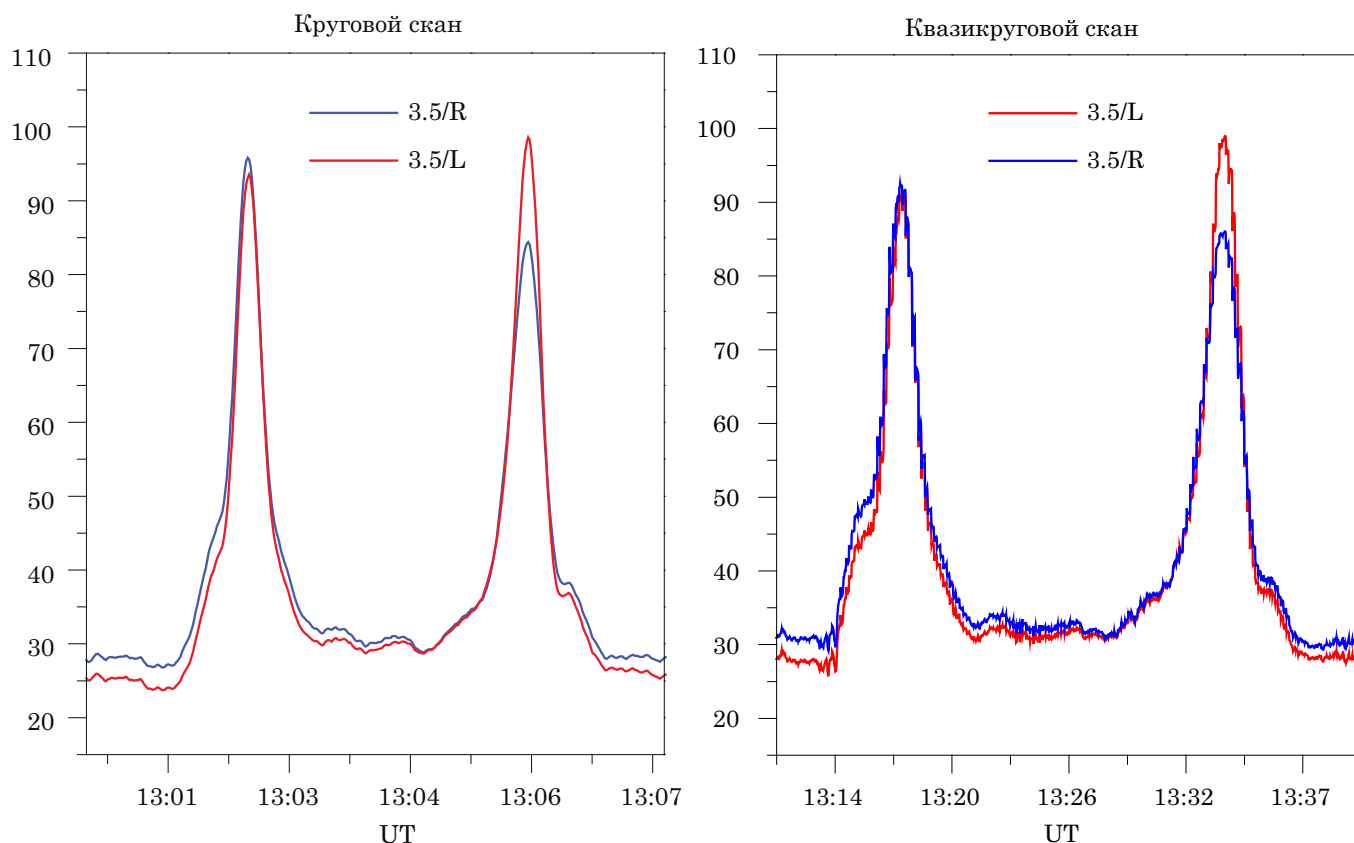


Рис. 6. Сравнение последовательных оригинальных записей полных круговых сканов (аналогичных сканам на рис. 1), полученных 15.04.2025 на РТ-32 в обсерватории «Светлое» на длине волны 3.5 см методом стандартного кругового сканирования (скан слева — гладкие записи) и квазикругового сканирования (скан справа — скачкообразные кривые). Радиус сканирования для обоих сканов равен видимому оптическому радиусу Солнца на день наблюдения. Регистрировались обе круговые поляризации (правая — 3.5/R и левая — 3.5/L)

Существенным преимуществом одиночных антенн является большая продолжительность солнечных наблюдений (практически от восхода до захода Солнца) при неизменных характеристиках ДН.

Благодарность

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

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета институтов. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Литература

Алтынцев А. Т., Лесовой С. В., Глоба М. В. и др. Многоволновый сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50.

Иванов Д. В., Рахимов И. А., Дьяков А. А. и др. 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.

Михайлов А. Г. Программное обеспечение центрального управляющего компьютера наблюдательного пункта РСДБ-сети КВАЗАР // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 12. С. 68–92.

Молчанов А. П. Наблюдение в ГАО смещений центра тяжести радиоизлучения Солнца // ИЗВ ГАО. 1960. Т. XXI. Вып. 5, № 164. С. 114–127.

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

Топчило Н. А., Нагнибеда В. Г., Петерова Н. Г. Опыт исследований прилиम्бовой зоны Солнца по наблюдениям на крупных полноповоротных радиотелескопах // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 65. С. 42–53.