

Опыт исследований прилиम्бовой зоны Солнца по наблюдениям на крупных полноповоротных радиотелескопах

© Н. А. Топчило¹, В. Г. Нагнибеда¹, Н. Г. Петерова²

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

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. Так что обычно используемый в радионаблюдениях метод растрового картографирования при выделении источников на лимбе Солнца приводит к большим ошибкам. Целью данной работы является демонстрация возможностей повышения точности прилиम्бовых наблюдений на существующих крупных полноповоротных антеннах.

Ранее, при использовании подобных радиотелескопов, имеющих характерный размер диаграммы направленности в несколько угловых минут, для устранения указанных ошибок был предложен иной метод — круговое сканирование (Топчило, 1983), когда телескоп выполняет круговые относительно центра Солнца сканы. Этот и другие разработанные методы были реализованы в начале 80-х годов на радиотелескопе РТ-22 ФИАН, а в конце 80-х и на РТ-22 КрАО. Подобные методы много лет использовались для картографирования Солнца на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Баумана на волнах 3.4 и 2.5 мм.

Для демонстрации преимуществ новых методов в статье приведены результаты проведенных в 80–90-х годах наблюдений солнечных протуберанцев за лимбом Солнца и волокон на диске в прилиम्бовых областях на волнах 8 мм и 1.35 см. 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 радиорadius Солнца.

Исходя из нашего опыта, можно заключить, что предложенные методы, без сомнения, могут быть реализованы и на радиотелескопах, входящих в комплекс «Квазар-КВО» ИПА РАН. Определен круг перспективных научных задач по солнечной тематике и требования к организации наблюдений и их программному обеспечению.

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

Контакты для связи: Топчило Николай Андреевич (topchilona@yandex.ru).

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.65.42-53>

Experience in Studying the Near-Limb Zone of the Sun Based on Observations on Large Full-Rotation Radio Telescopes

N. A. Topchilo¹, V. G. Nagnibeda¹, N. G. Peterova²

¹Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

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

Abstract

Observations of the near-limb zone are of particular importance for the study of the solar atmosphere, since they provide information about its altitudinal structure. The microwave-observable chromosphere, transition region, and lower corona contain a large number of non-stationary 3D structures of various types and sizes, the difficulties of studying which increase significantly in this zone due to the presence of a strong general height brightness gradient. So, the method of raster mapping commonly used in radio observations leads to large errors when identifying sources on the limb of the Sun. The purpose of this work is to demonstrate the possibilities of improving the accuracy of near-limb observations on existing large full-rotation antennas.

Previously, when using similar radio telescopes with a characteristic beam size of a few arc minutes, another method was proposed to eliminate these errors—circular scanning, when the telescope performs circular scans relative to the center of the Sun. This and other developed methods were implemented in the early 80s on the RT-22 radio telescope of the Lebedev Physical Institute, and in the late 80s on the RT-22 CrAO. Similar methods have been used for many years to

map the Sun with the RT-7.5 radio telescope of the Bauman Moscow State Technical University on waves 3.4 and 2.5 mm.

To demonstrate the advantages of new methods, the article presents the results of observations of solar prominences behind the solar limb and filaments on the disk in near-limb regions at wavelengths of 8 mm and 1.35 cm, carried out in the 1980s and 1990s. Their positions, sizes along the limb, and heights, measured magnetic field. Cases of observations of the rise and destruction of prominences, as well as coronal mass ejections (CMEs) have been noted. The values of the radio radius of the Sun were measured.

Based on our experience, we can conclude that the proposed methods can undoubtedly be implemented on radio telescopes included in the Quasar-KVO complex of the IAA RAS. A range of promising scientific problems on solar topics and requirements for the organization of observations and their software are determined.

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

Contacts: Nikolay A. Topchilo (topchilona@yandex.ru).

For citation: Topchilo N. A., Nagnibeda V. G., Peterova N. G. Experience in studying the near-limb zone of the Sun based on observations on large full-rotation radio telescopes // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 65. P. 42–53. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.65.42-53>

Введение

Атмосфера Солнца представляет собой сложное, нестационарное плазменное образование. Она содержит большое количество 3-мерных структур разных типов и размеров с характеристиками, существенно различающимися по высоте и вдоль поверхности Солнца (рис. 1). Для получения в наблюдениях максимального углового разрешения оптимальным для большинства объектов является наблюдение их вблизи центра солнечного диска, когда из-за проекционных эффектов они имеют наибольший угловой размер. Однако при этом вертикальная структура объекта остается неопределенной. Частично эта проблема решается с помощью наблюдения на разных длинах волн. Но в этом случае непосредственно измеряются зависимости от оптической толщины, а не от геометрической высоты, и для их пересчета требуется ряд неочевидных априорных предположений.

Другим вариантом наблюдений является наблюдение объекта близко к краю диска Солнца, когда он виден практически сбоку и его яркость в картинной плоскости непосредственно отражает высотное распределение его физических параметров и не требует трудоемких спектральных наблюдений. При этом определение распределения характеристик вдоль поверхности Солнца ограничено. Оба варианта наблюдений взаимно дополняют друг друга, и при их сочетании трехмерная структура объектов определяется более надежно.

В радиоастрономии с конца 50-х годов, после создания достаточно крупных параболических антенн и приемников коротковолнового (мм) излучения, появилась возможность получения двумерных карт Солнца с хорошим пространственным разрешением (1–2). В СССР это радиотелескопы РТ-22 ФИАН и КрАО (рис. 2, 3), а также РТ-7.5 МГТУ.

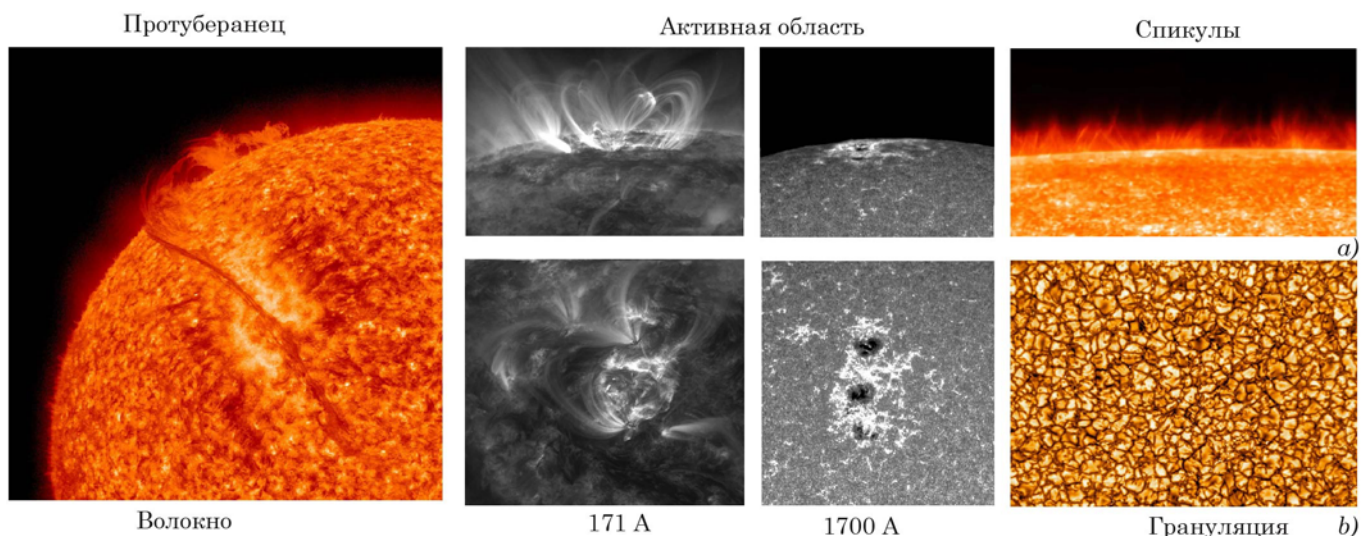


Рис. 1. Примеры солнечных объектов при наблюдении их: *a* — в прилиम्бовой зоне и *b* — в центральной части диска Солнца

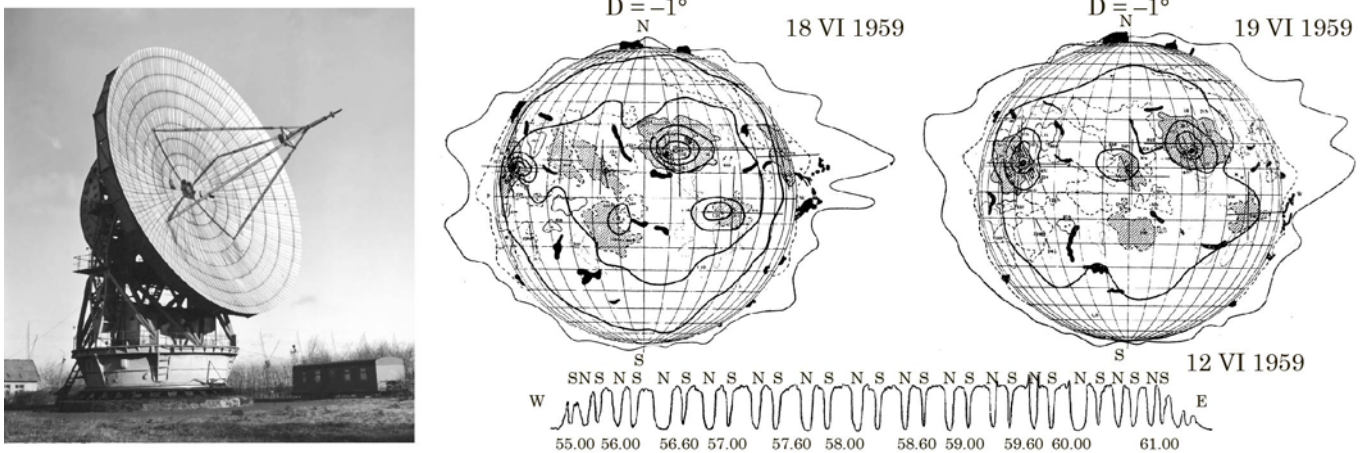


Рис. 2. Радиотелескоп РТ-22 ФИАН и пример карт Солнца в диапазоне 8 мм (Саломонович, 1962)

С их помощью на миллиметровых волнах исследовались характеристики локальных источников — потоки, размеры, яркостные температуры и динамика их изменения при вращении Солнца.

Для построения карт использовалось, как правило, растровое сканирование по одной из координат, обычно по азимуту/высоте или по альфа/дельта (рис. 2). В результате чего на карте нередко появлялась вытянутость изофот в направлении сканирования (см. карту на 6 мм на рис. 3), связанная с погрешностями в калибровках отдельных сканов, смещениями их при реверсе и изменением поглощения в атмосфере со временем.

Особенно дефекты при картографировании проявляются в прилиम्бовой области, где имеется большой градиент интенсивности сигнала. Для наблюдения в этой области в начале 80-х годов были разработаны специальные методы сканирования (круговое и радиальное), позволившие быстро и наглядно выделять компактные источники (Топчило, 1983). В данной статье, как и в наших работах, используется прямоугольная или полярная система координат в картинной плоскости, связанная с центром диска Солнца. Ось ординат идет от центра диска Солнца в направлении его северного полюса (на картах обозначается как N), ось абсцисс — от центра диска в западном направлении (обозначается как W). В полярных координатах полярный угол (φ) отсчитывается от оси абс-

цисс против часовой стрелки. $\varphi > 360^\circ$ на круговых сканах используется для удобства представления направления сканирования.

Методика прилиम्бовых наблюдений

Методика выделения источника основана на сравнении скана через источник с реперным (фоновым) сканом, измеренным или рассчитанным, который отличается от скана через источник только отсутствием источника.

Для **радиального сканирования** (все сканы проходят через центр Солнца) и симметричной диаграммы направленности при отсутствии активности все сканы должны быть идентичны или мало меняться в зависимости от угла сканирования (рис. 4). Их разности представляют собой имеющуюся активность. В приведенном примере активность сосредоточена на диске Солнца, в особенности на угле $\varphi = 70^\circ$.

Для **кругового сканирования** (рис. 5), при котором диаграмма направленности (ДН) перемещается по окружности вокруг центра солнечного диска на разных от него расстояниях, реперный скан выглядит значительно проще. Для ДН любой формы с круговой симметрией круговой скан, если он не проходит через активный источник, дает сигнал одинаковой величины, а развертка скана на записи представляет собой горизонтальную прямую линию. В неидеальных условиях, например

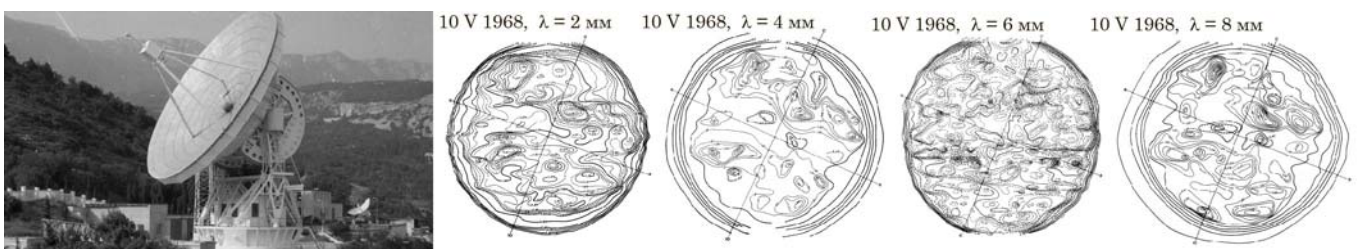


Рис. 3. Радиотелескоп РТ-22 КраО и примеры карт Солнца в диапазоне 2–8 мм (Ефанов, 1972) с угловым разрешением 1.2–1.8'

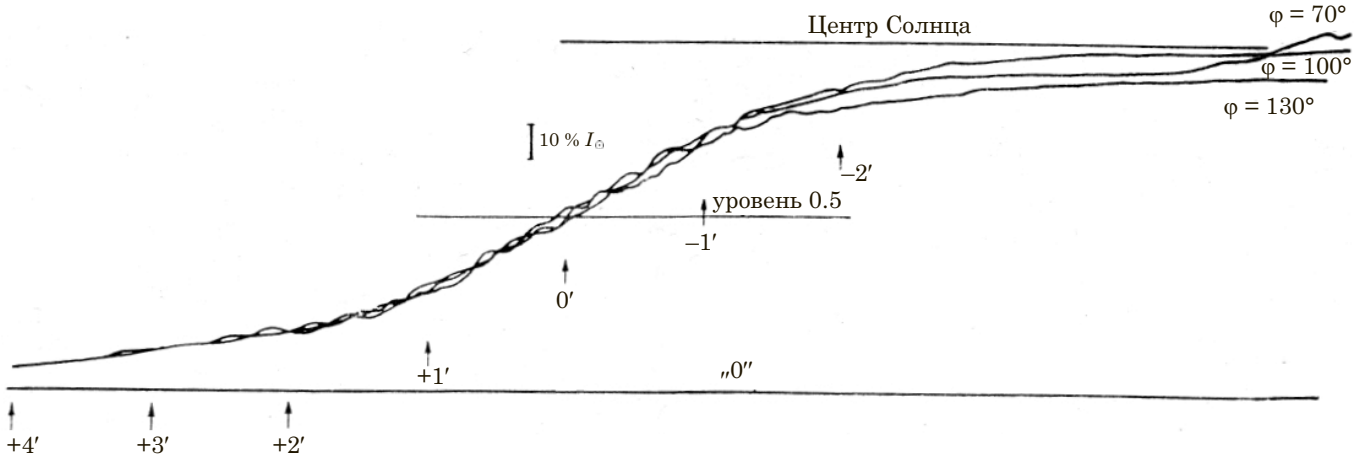


Рис. 4. Совмещение записей края спокойного Солнца для разных направлений радиального сканирования

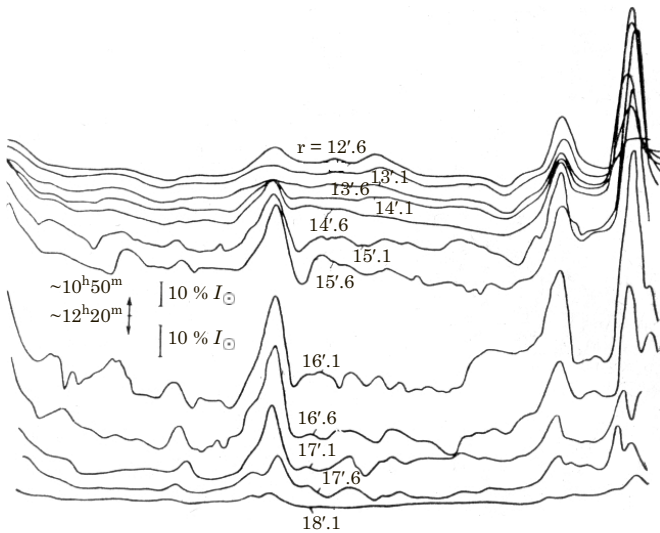


Рис. 5. Набор сканов круговой карты, покрывающий большую часть прилиम्бовой зоны. Длина каждого скана — 360° (полная окружность). Радиусы сканирования от $12.6'$ до $18.1'$ с шагом $0.5'$ (время сканирования с $\sim 10^{\text{h}}50^{\text{m}}$ до $\sim 12^{\text{h}}20^{\text{m}}$). Ширина диаграммы направленности радиотелескопа — $2.5'$

при разъюстировке, эта линия становится длинной синусоидой или другой медленно меняющейся функцией, которую легко можно удалить даже не зная ее точной формы. Данную процедуру можно применять как в канале интенсивности, так и в канале круговой поляризации (рис. 6).

Описанная методика прилиम्бовых наблюдений была реализована и начала применяться с начала 80-х годов на радиотелескопе РТ-22 ФИАН на волнах 8 и 13.5 мм в интенсивности, а в конце 80-х и начале 90-х — на РТ-22 КрАО на волне 8 мм в интенсивности и на 13.5 мм — в интенсивности и круговой поляризации. Главным объектом исследований были залимбовые протуберанцы и в меньшей степени — волокна на диске Солнца. К сожалению, в начале 90-х эти наблюдения на обоих телескопах были прекращены по финансовым причинам. Подобные методы много лет использовались для картографирования Солнца на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Баумана на волнах 3.4 и 2.5 мм (Solovyev, 1992).

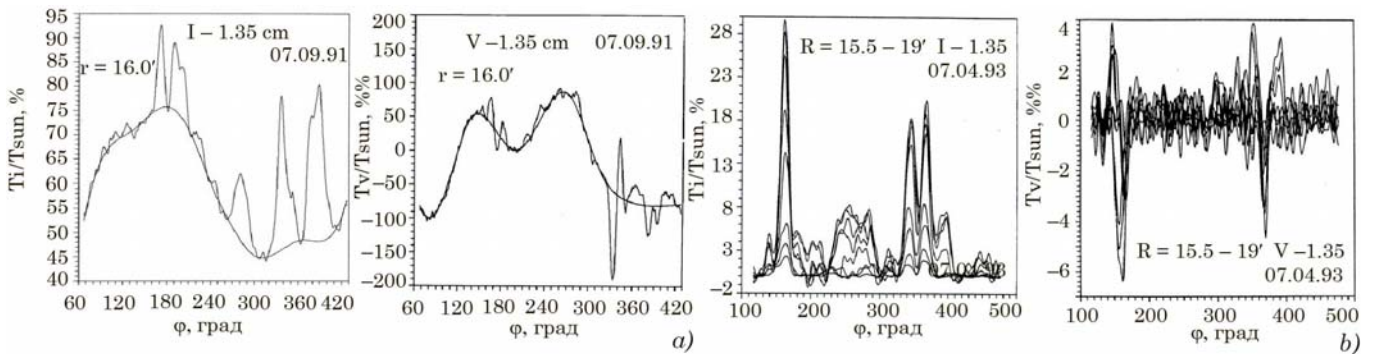


Рис. 6. *a* — пример проведения фона на круговом скане радиусом $16'$, полученном 07.09.1991 на РТ-22 КрАО на волне 1.35 см в интенсивности (T_i) и круговой поляризации (T_v); *b* — результат удаления фона для набора круговых сканов (записи от 07.04.1993) с радиусом сканирования от $15.5'$ до $19'$ с шагом $0.5'$. Шумовая дорожка в интенсивности составляет не более $\pm 1\%$, а в поляризации не более $\pm 0.01\%$ от уровня спокойного Солнца (T_{Sun}); ϕ — полярный угол, отсчитываемый от направления на точку запада (W)

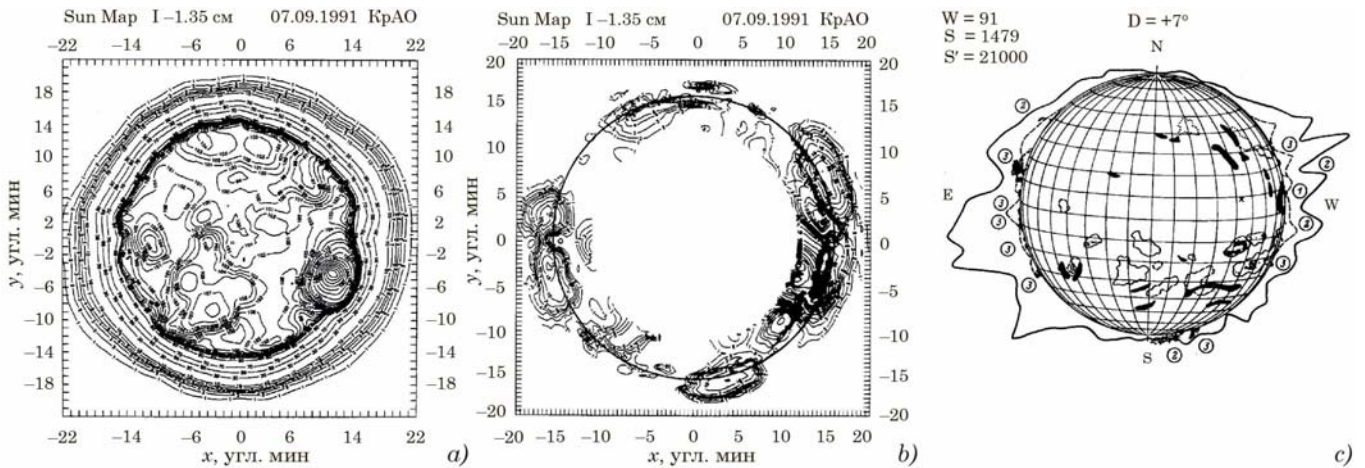


Рис. 7. Пример картографирования всего Солнца на волне 1.35 см в интенсивности — *a* и результатов выделения источников в прилиम्бовой зоне с помощью кругового сканирования — *b*. Изофоты приведены в процентах к уровню спокойного Солнца. *c* — источники, видимые в оптике на день наблюдения по материалам бюлл. «Солнечные данные»

Картографирование Солнца

Основой исследования солнечных объектов является построение карты Солнца (или его части) с последующим разделением изображения на компоненты — спокойное Солнце, источники на диске Солнца и источники за лимбом. Часто, особенно на коротких волнах, сигнал от спокойного Солнца, выступающего в роли фона, значительно превышает сигнал от источников, так что на растровых картах (рис. 7*a*) источники на краю Солнца видны лишь как незначительные изгибы изофот, и результат их выделения сильно зависит от оптимальности методики измерения. Проведенные на РТ-22 наблюдения при использовании новых методов показали возможность определения амплитуды источников с точностью до 1% в единичных измерениях как на диске Солнца, так и в прилиम्бовой зоне (рис. 7*b*).

Поскольку на РТ-22 проводились наблюдения протуберанцев, картографирование диска Солнца на них выполнялось достаточно редко, и основной

массив наблюдений и анализ активности на диске Солнца был получен на РТ-7.5 (рис. 8).

Анализ большого числа подобных радиокарт привел к выводу о наличии в распределении радиояркости по диску Солнца, по крайней мере на коротких миллиметровых волнах, так называемых широтных поясов повышенной радиояркости, совпадающих с «королевской зоной» активности (широты в пределах $\pm(10-50$ град.), радиояркость которых в отсутствие активных областей немного (примерно на 1%) выше яркости экваториальной зоны. Такая структура в распределении радиояркости хорошо видна и на синоптических картах, построенных на основе ежедневных радиокарт Солнца, пример которых приведен на рис. 9. Очевидно, что такой характер распределения радиояркости отражает характер распределения свойств хромосферы, что несомненно связано с распределением крупномасштабного магнитного поля Солнца.

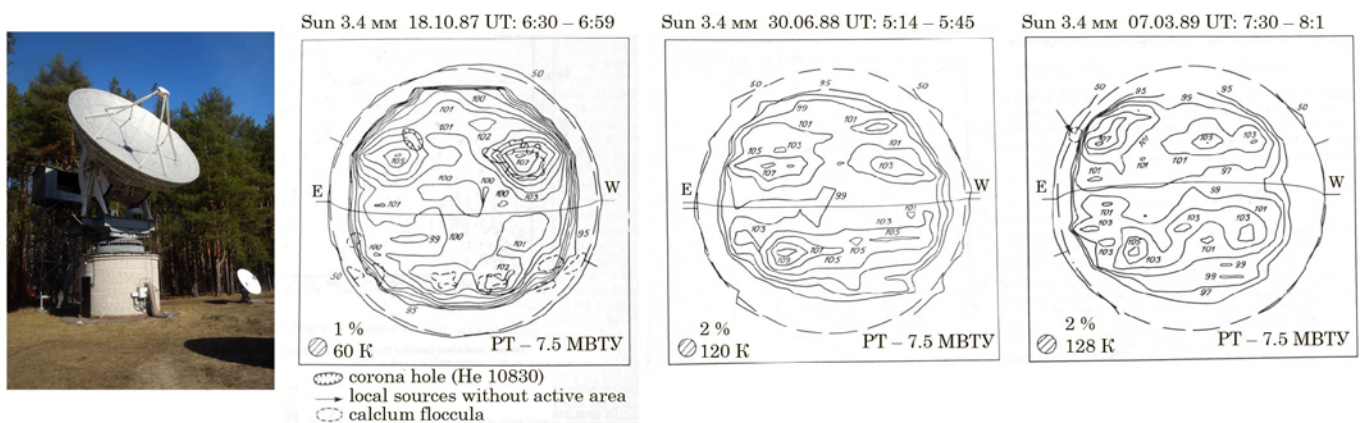


Рис. 8. Пример картографирования Солнца на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ ([Nagnibeda, 1994](#))

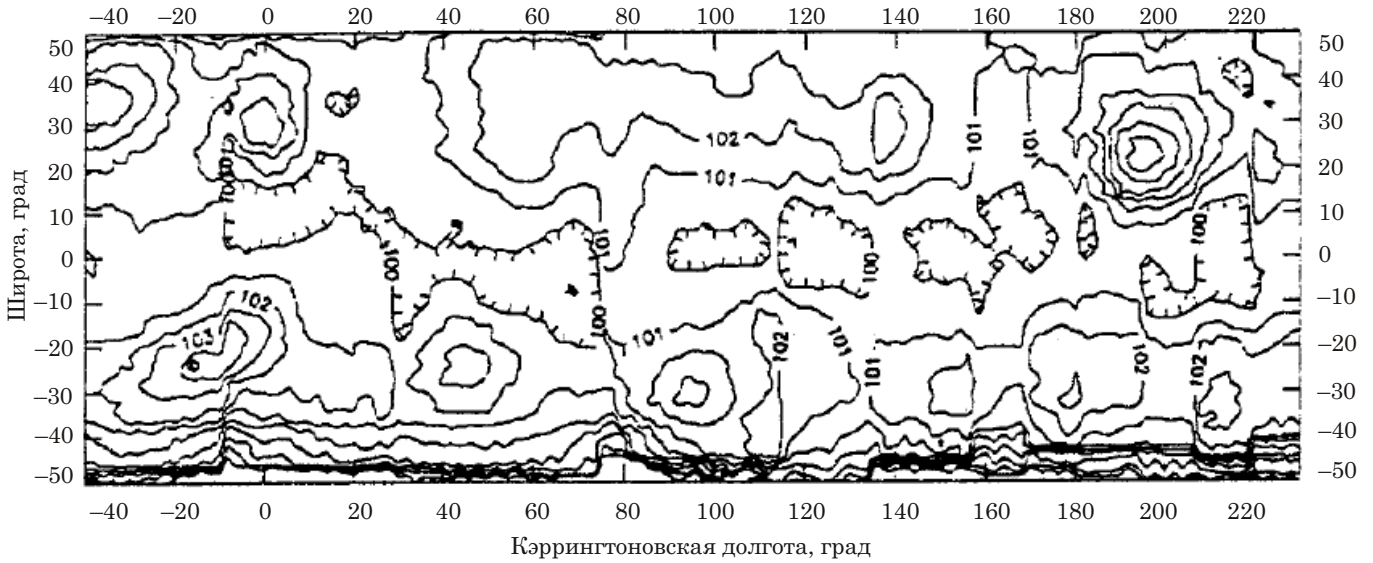


Рис. 9. Синоптическая карта нормированного излучения на волне 3.4 мм для Кэррингтоновского оборота №1794 (13.10–2.11.1987) (Nagnibeda, 1994). Излучение нормируется к излучению спокойного Солнца в %; контуры от 95 % с шагом 1 %

Поляризационные наблюдения

Измерение поляризации излучения позволяет определить дополнительную характеристику источника — его магнитное поле (МП). Особенно это значимо для наблюдений на краю Солнца, поскольку позволяет измерить не только величину МП, но и его высотное распределение, что исключительно важно для построения пространственной

модели источника. Такие измерения, с одной стороны, проще, чем измерения интенсивности излучения, поскольку спокойное Солнце в среднем не поляризовано. С другой стороны, они требуют использования специальных технических решений для борьбы с ложной поляризацией (рис. 10) и в случае успеха позволяют измерять продольную компоненту МП с точностью до 1 Гс (рис. 10с).

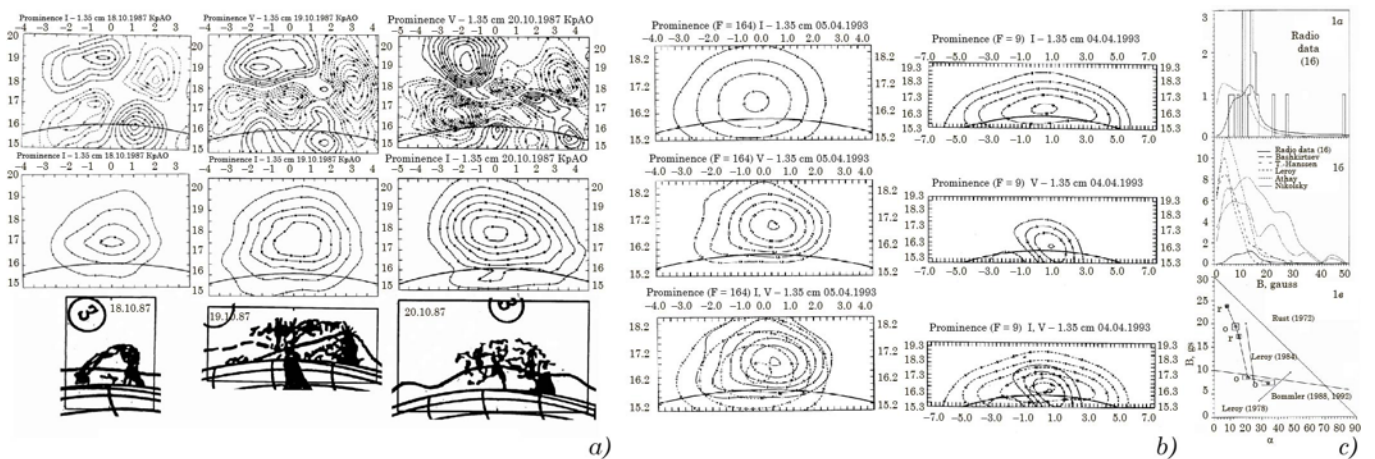


Рис. 10. *a* — наблюдения с круглым рупором, обладающим большими кросс-поляризационными лепестками: в первом столбце пример наблюдения протуберанца со слабым собственным МП, второй и третий столбец — с сильными МП; *b* — наблюдения со скалярным рупором, кросс-поляризация отсутствует, здесь видна только собственная поляризация протуберанцев, неоднородная по телу протуберанцев. Карты приведены в прямоугольной системе координат, повернутой относительно солнечной на полярный угол центра протуберанца (F). Координаты на картах приведены в угловых минутах; *c* — результаты измерений МП протуберанцев в КрАО (Топчило, 2007): *1a* — гистограмма распределения величины МП по нашим измерениям; *1b* — сравнение ее с измерениями в оптическом диапазоне; *1c* — зависимость величины МП от угла между лучом зрения и длиной осью протуберанца

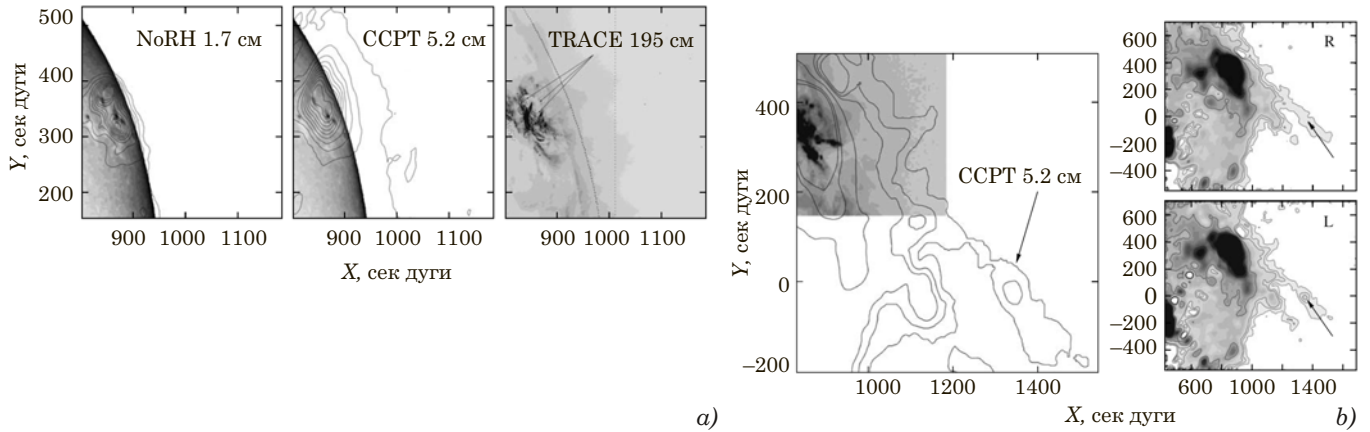


Рис. 11. *a* — предвспышечное состояние АО 10338 с темной (негативное изображение), поднимающейся петлей (27.04.2003, 00:40 UT); *b* — послевспышечный залимбовый поляризованный выброс (01:15 UT)

Наблюдение динамических процессов

Для динамических процессов типа вспышек, активизаций протуберанцев и выбросов корональных масс (СМЕ) характерны как изменение яркости объекта, так и их пространственное перемещение. Наилучшим образом оба этих параметра измеряются на крупных интерферометрах, которые сочетают большое поле зрения с хорошим пространственным и временным разрешением, например ССРТ (рис. 11), развитие всплеска с СМЕ (Кардаполова, 2008).

На инструментах с относительно широкой ДН регистрация изменения яркости проблем не составляет, но регистрация смещений затруднена, поскольку требует время на снятие карты (пусть и небольшой) области, где происходит это событие. Наиболее это эффективно, когда событие происхо-

дит в прилибмовой зоне, где вертикальные перемещения максимально заметны. В наших наблюдениях такие случаи встречались, но редко (рис. 12). Для такого события не нужны построения полной карты Солнца, достаточно построения мини-карты из круговых и радиальных сканов в ограниченной области вокруг источника. Единственной проблемой здесь стало определение момента начала активации источника, чтобы переключиться на его наблюдение. В настоящее время это достаточно легко решается с помощью наблюдений на космических аппаратах (например, SDO), данные с которых выставляются практически в реальном времени.

Подобное явление быстрого смещения протуберанца вдоль лимба наблюдалось и на РТ-7.5 на длине волны 3.2 мм (Nagnibeda, 1994).

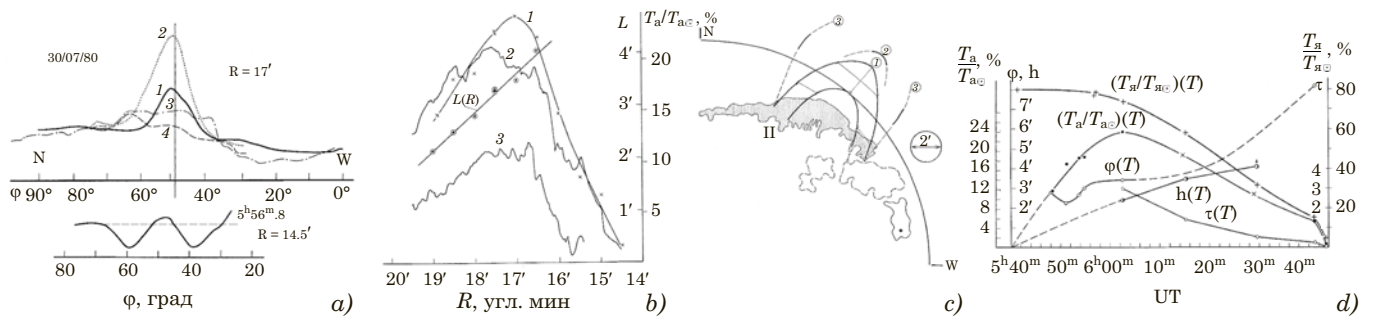


Рис. 12. Пример наблюдения на РТ-22 ФИАН на 8.2 мм подъема и разрушения волокна с использованием кругового и радиального сканирования (Апушкинский, 1984). На диске Солнца волокно наблюдалось в поглощении, а за лимбом в излучении: *a* — круговые сканы через волокно — протуберанец с радиусом сканирования $R = 17'$ (сверху) для трех времен: 1 — начало регистрации процесса, 2 — максимум сигнала, 3 и 4 — стадии завершения разрушения, и для $R = 14.5'$ (внизу) в начале процесса; *b* — распределение по высоте нормированной антенной температуры протуберанца (T_a , фон удален) для трех моментов времени (1, 2, 3) и размер протуберанца вдоль лимба (L) на разных высотах (прямая линия); *c* — сопоставление оптического и радиоизображения разрушающегося волокна в виде поднимающейся арки для трех моментов времени; *d* — изменение во времени нормированной антенной (T_a) и яркостной ($T_я$) температуры протуберанца, его размеров (ϕ), высоты (h) и оптической толщины (τ)

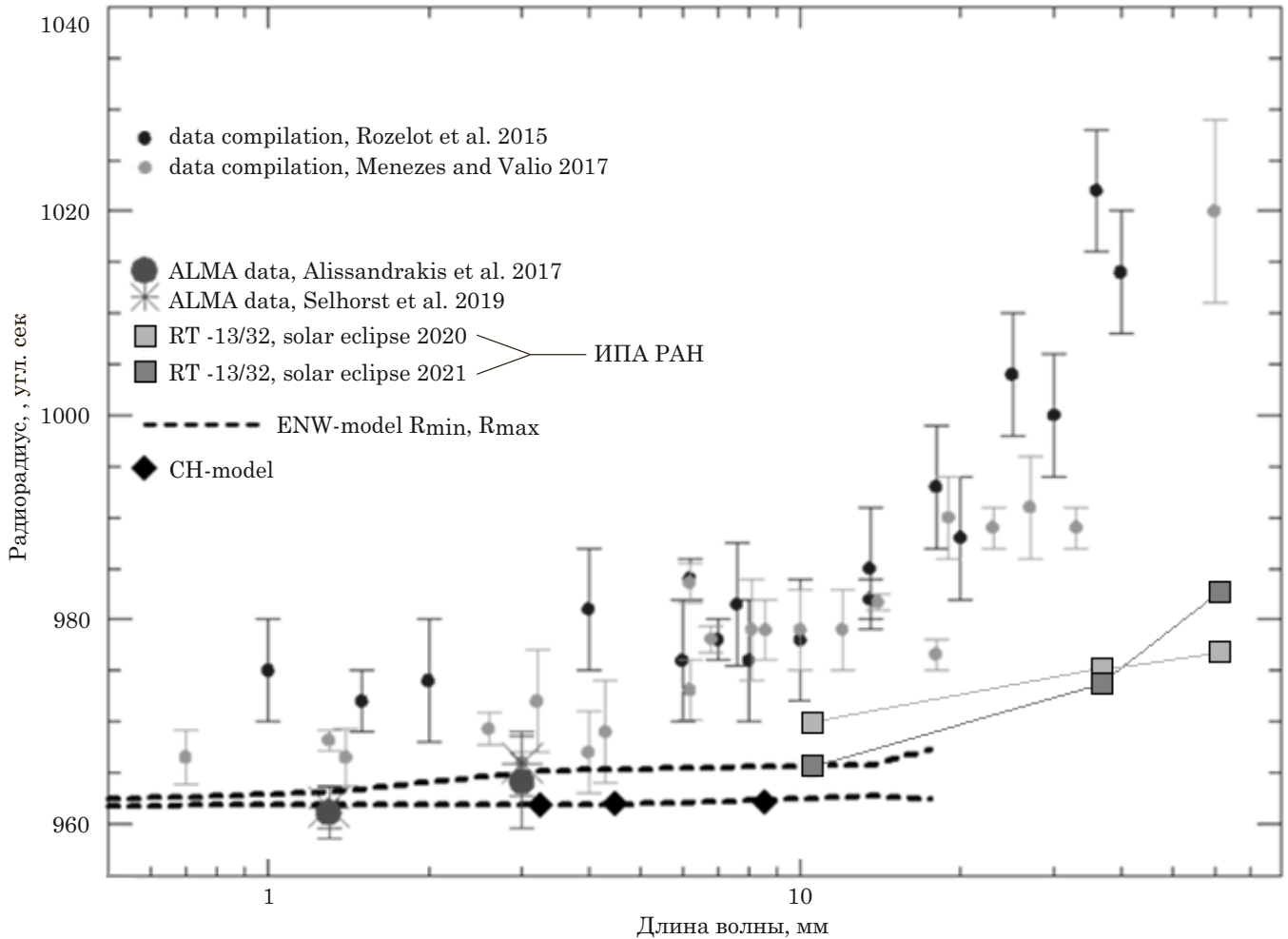


Рис. 13. Сравнение измерений радиорadiusа Солнца по наблюдениям солнечных затмений 21.06.2020 г. и 10.06.2021 г. на радиотелескопах ИПА РАН с данными в литературе (Иванов, 2021).

Измерение радиорadiusа

Наилучшим способом измерения распределения радиоизлучения на краю Солнца и его важного параметра — величины радиорadiusа — представляется использование солнечных затмений, дающих угловое разрешение, значительно превосходящее угловое разрешение одиночных радиотелескопов. К сожалению, затмения имеют несколько существенных недостатков — они бывают редко, часто в неудобных местах, и точки контактов могут приходиться на участки лимба с повышенной активностью. Наблюдения на одиночных зеркалах лишены этих недостатков. Измерение радиорadiusа на них возможно также по форме записи края Солнца и его производной (Топчило, 1987). Использование радиального сканирования позволяет избежать влияния прилимовых источников на результаты измерения радиорadiusа. Измерения обоими способами проводятся долгие годы, и к настоящему времени сложилась неоднозначная ситуация: наблюдения на отдельных зеркалах дают заметно большие значения радиорadiusа, чем затменные измерения (рис. 13).

Причина этого пока не установлена, возможно, что-то различается в самих методиках измерений. В любом случае, необходимо проведение одновременных наблюдений обоими способами на одном инструменте.

Технические ограничения прилимовых наблюдений

При радиоастрономических наблюдениях есть много причин, вызывающих искажения принимаемого сигнала от источника, — это инструментальные (неидеальность движения телескопа, зависимость его характеристик от направления ДН и времени), аппаратные (недостаточная чувствительность и нестабильность характеристик приемной аппаратуры, дефекты в линиях передачи и др.) и внешние помехи как природного (состояние и временные изменения параметров атмосферы, рефракция, излучение Земли и т. п.), так и искусственного происхождения (помехи от наземных устройств, предметов и от космических аппаратов). Многие из этих причин неустраняемы, и их влияние трудно измерить, в особенности по отдельности.

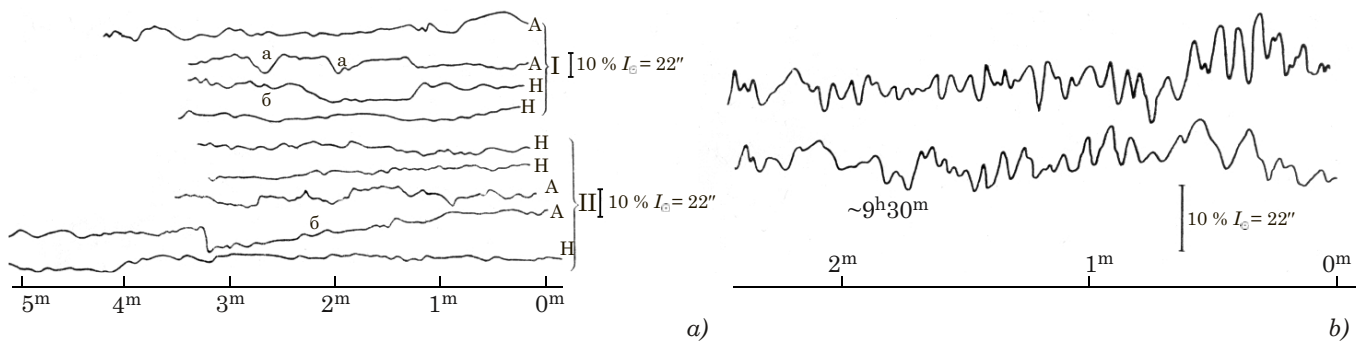


Рис. 14. Слежение за лимбом Солнца на РТ-22: *a* — кривые, отмеченные буквой А, получены при сдвиге ДН на край Солнца по азимуту, Н — при сдвиге ДН по высоте; набор кривых, отмеченных I, получен в утренние часы, набор кривых, отмеченных II, получен в кульминацию; *b* — слежение в условиях сильного ветра, скорость ветра составляла 5–17 м/с с порывами до 25 м/с, масштаб записей, нормированных к уровню спокойного Солнца (I_{\odot}), показан на графиках вертикальной чертой

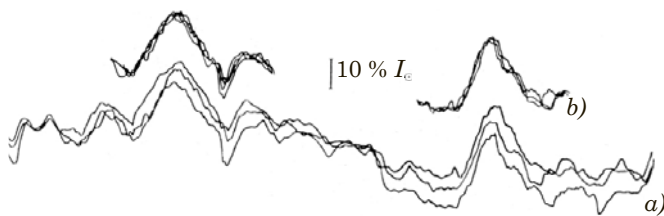


Рис. 15. Усреднение записей источников на круговых сканах: *a* — крупномасштабные искажения сканов; *b* — мелкомасштабные искажения

При этом многие задачи физики Солнца требуют изучения динамики (причем разных временных масштабов) исследуемых объектов, что накладывает жесткие требования на частоту и непрерывность наблюдений, которые необходимо проводить в любых, даже самых неблагоприятных, условиях. Прилиббовые же наблюдения имеют дополнительные трудности, связанные с наличием у Солнца резкого края (области с большим градиентом яркости), представляющего для измеряемых объектов сильную дополнительную помеху.

В идеале искажения (ошибки) сигнала нужно определять непосредственно во время самих измерений. Это может занимать слишком много драгоценного наблюдательного времени, и в обстоятельствах наших наблюдений специальные измерения ошибок проводились достаточно редко. Некоторые их обобщенные результаты для РТ-22 ФИАН представлены в статье (Топчило, 1983), отдельные рисунки из которой приведены ниже (рис. 14–16).

Как показали измерения, основным источником искажений записей при наблюдениях в прилиббовой зоне являются погрешности в движении радиотелескопа (рис. 14). Максимальные искажения наблюдаются при нахождении ДН на лимбе Солнца.

Искажения записи при слежении могут носить характер хаотических флуктуаций с амплитудой до 5 % I_{\odot} (рис. 14*a*) и характерной длительностью ~7 с, а также отдельных «изолированных» источников (*a*) или источников типа «пила» (*b*) с большой характерной длительностью. С большой вероятностью эти детали являются артефактами. При сильном ветре могут возникать колебания сигнала (рис. 14*b*). Амплитуды колебаний составляли менее 10 % I_{\odot} .

При рассмотрении результатов кругового сканирования (рис. 15*a* — наложение записей трех последовательных круговых сканов) также наблюдаются флуктуации различного временного масштаба. Причем изменения от скана к скану (длительные изменения) при постоянном угле пространственно скоррелированы, что соответствует прогрессирующей разъюстировке телескопа. Мелкомасштабные же изменения сигналов для двух крупных наблюдаемых источников после совмещения сканов (рис. 15*b*) не коррелируют и показывают разброс кривых в максимуме в 2 % I_{\odot} , т. е. точность измерения амплитуды этих источников составляет ~1 % I_{\odot} . Примерно такая же точность получается при совмещении радиальных сканов (рис. 4) и из уровня шумовой дорожки для РТ-22 КрАО (рис. 6*a*).

Хорошее соответствие результатов, полученных при измерении источников в прилиббовой зоне с помощью разных методов, видно и на рис. 16. Амплитуды источника на угле 150° (радиус = 17'), полученные из кругового скана и путем слежения за тремя точками на скане (130°, 150°, 170°), показали прекрасное совпадение. Несколько хуже получилось у радиального сканирования. Амплитуда источника оказалась заметно меньше. Но с учетом того, что идентичные сканы 1 и 2 через максимум источника сильно различаются между собой, отмеченное различие амплитуд можно отнести на неудачный момент их наблюдения.

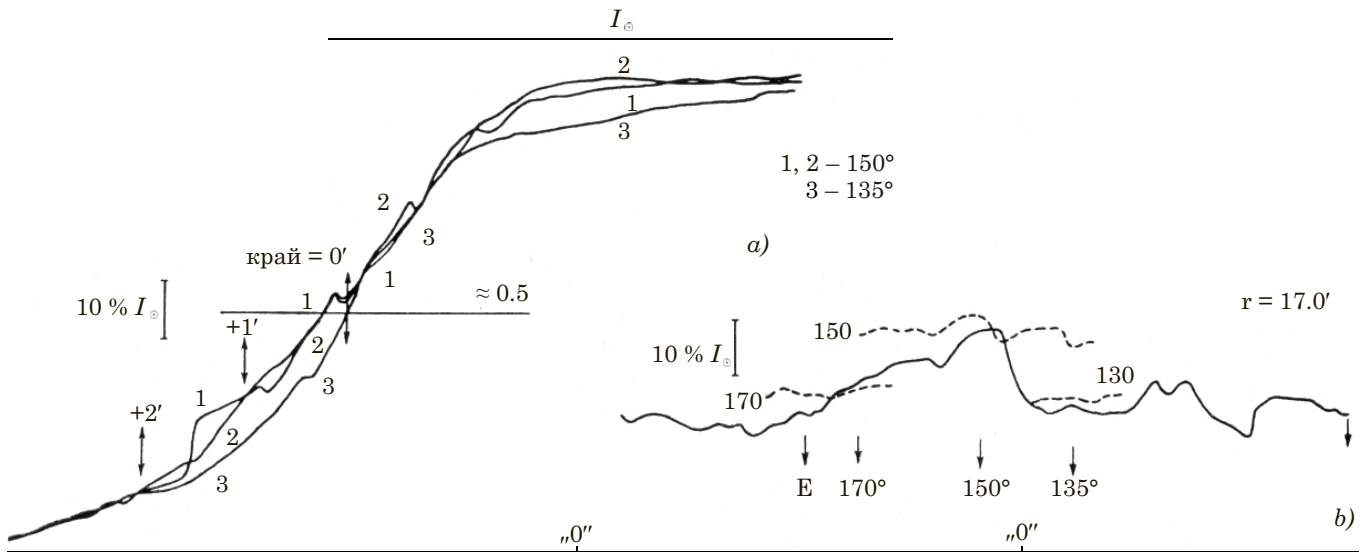


Рис. 16. Выделение источника на краю Солнца с помощью различных методов: *a* — совмещение двух радиальных сканов через источник (1, 2) и скана по спокойному Солнцу (3); *b* — совмещение части кругового скана, содержащего источник (сплошная линия), и записей слежения за соответствующими точками (пунктирные кривые)

Приведенные результаты относятся к состоянию радиотелескопов РТ-22 ФИАН и РТ-22 КрАО в 80–90-х годах. Более новые данные получены для РТ-22 ФИАН и радиотелескопов ИПА РАН в 2020–2022 гг. (пример на рис. 17). Новая информация относится к периодам подготовки к наблюдениям затмений и, к сожалению, весьма неполна и фрагментарна. Она показывает, что уровень флуктуаций сигнала был не выше, чем в прошлые годы, и вероятность получения качественных ре-

зультатов в случае возобновления наблюдений по предлагаемым методикам высока.

Рассмотренные и использованные нами методы не являются единственно возможными или сильно оптимизированными. Теоретически для построения модели источника по наблюдениям нужна только сетка отсчетов, покрывающая источник, с шагом по координатам не более полуширины ДН. При этом, каким способом и в каком порядке получены отсчеты, принципиального значения не имеет.

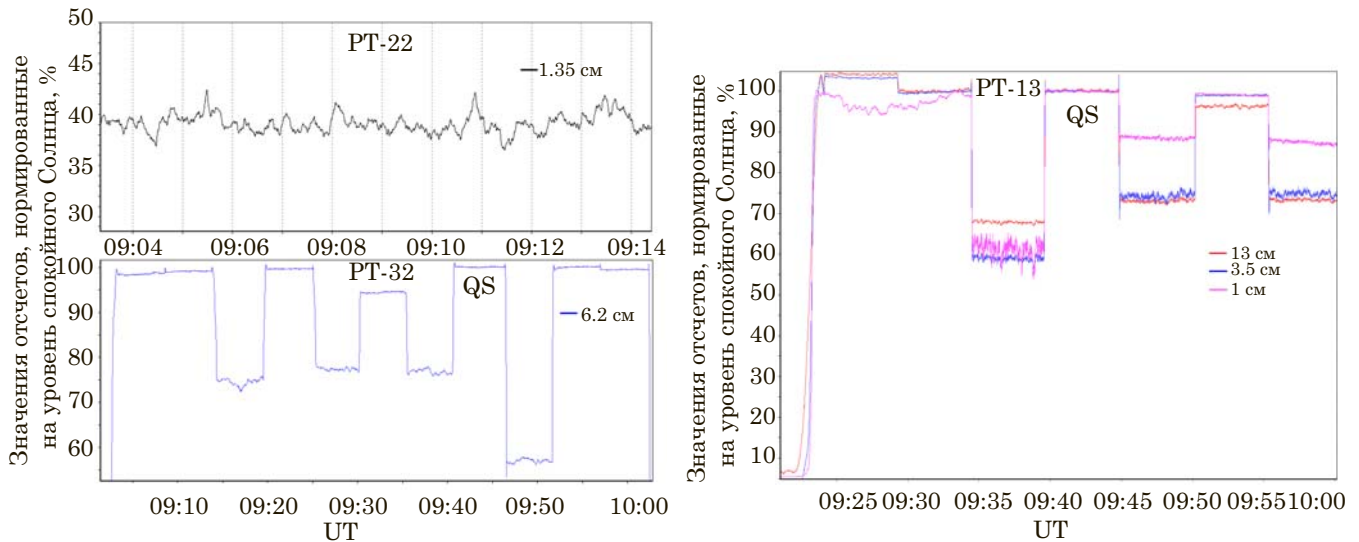


Рис. 17. Примеры слежения за спокойным Солнцем (QS) и различными источниками на солнечном диске, а также различными местами на краю Солнца на радиотелескопах РТ-22 ФИАН (25.10.2022), РТ-13 ИПА РАН РАО «Бадарь» (19.06.2020) и РТ-32 ИПА РАН РАО «Бадарь» (18.06.2020). Для РТ-22 постоянная времени $\tau = 0.1$ с, для РТ-13 $\tau = 0.25$ с, для РТ-32 $\tau = 1$ с. На РТ-13 в период с 9:24 по 9:35 UT на волнах ~ 1 см наблюдалось прохождение облака

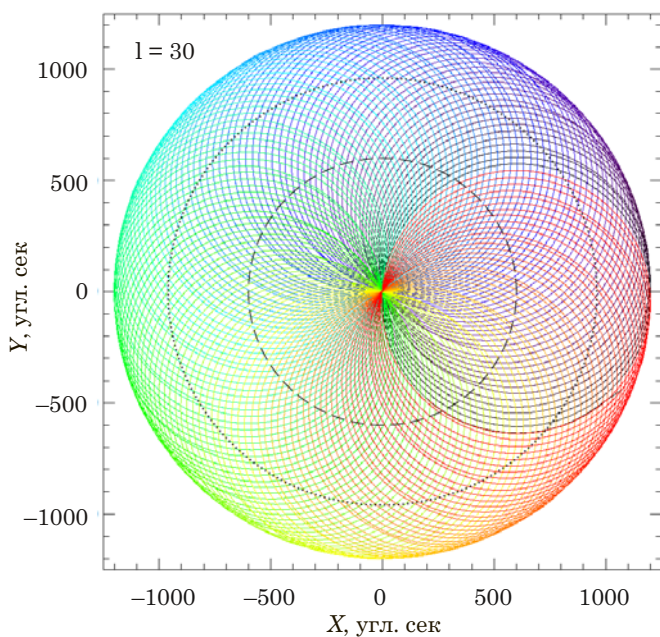


Рис. 18. Траектория движения ДН телескопа в схеме двойного кругового сканирования Солнца

Например, для одиночных антенн интерферометра ALMA для построения полной карты Солнца была использована представленная на рис. 18 схема (White, 2017, Fig. 1). Особенность движения телескопа в ней заключается в том, что ДН телескопа движется по окружности, одна точка которой проходит через центр диска Солнца, а центр этой окружности вращается вокруг центра Солнца (штриховая линия), таким образом покрывая весь солнечный диск (пунктирная линия — солнечный лимб) и часть атмосферы над лимбом, если диаметр окружности сканирования больше радиуса диска Солнца.

Такая схема сканирования удобна при построении полной карты для взаимной привязки отдельных круговых сканов по амплитуде сигнала, поскольку все сканы имеют единую точку пересечения в центре диска Солнца, при этом каждая точка диска проходится дважды. Но для исследования отдельных локальных областей такая схема слишком затратна, даже при ограничении углов сканирования областью расположения источника. Применимость ее на отечественных антеннах требует специального исследования. В чем-то эта схема напоминает радиальное сканирование, если сканы начинать от центра Солнца.

Перспективы и научные задачи наблюдения прилиम्бовой зоны

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

1. Прямое измерение высот/размеров стационарных корональных объектов по наблюдениям их положения на лимбе Солнца;
2. Наблюдение протуберанцев и измерение их магнитного поля;
3. Наблюдения динамики поствспышечного состояния области краевой или окололиम्бовой вспышки;
4. Наблюдение CME в нижней короне, недоступное наблюдениям на LASCO;
5. Регулярные измерения радиорadiusа Солнца.

Технические требования к режимам работы и программному обеспечению

Наш опыт наблюдений на крупных радиотелескопах показал, что для проведения эффективных солнечных наблюдений, включающих как сами наблюдения, так и их последующую обработку, требуется:

1. Управление движением телескопа в различных режимах (слежение, сканирование разных видов) и в разных системах координат (азимутальной, эклиптической и в особенности солнечной);
2. Оперативный (on-line) выбор новых объектов наблюдения и режима работы исходя из текущей обстановки на Солнце (например, по текущим картинкам SDO в интернете) и результатам прошедших этапов текущего наблюдения;
3. Вывод снимаемых отсчетов с автоматической их разбивкой по отдельным этапам работы (по отдельным записям, сканам, источникам и т. п.);
4. Предварительная on-line обработка завершённых этапов в процессе текущего наблюдения.

Заключение

Наш опыт использования крупных полноповоротных радиотелескопов показывает, что они могут эффективно использоваться для наблюдения прилиम्бовой зоны Солнца и явиться важным дополнением существующих и проектируемых радиогелиографов. Авторы предлагают возобновить подобные наблюдения на имеющихся в Российской Федерации инструментах, включая радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» ИПА РАН.

Литература

- Апушкинский Г. П., Топчило Н. А. Внезапное исчезновение спокойных протуберанцев // *Астрономический журнал*. 1984. Т. 61, Вып. 6. С. 1150–1157.
- Ефанов В. А., Кисляков А. Г., Лебский Г. В. и др. Распределение радиоизлучения по диску Солнца на волнах 2, 4, 6 и 8 мм // *Изв. КраО*. 1972. Т. 44. С. 137–173.
- Иванов Д. В., Инатов А. В., Рахимов И. А. и др. Первые результаты радионаблюдений солнечного затмения 10.06.2021 г. в обсерваториях «Светлое» и «Бадарь» // *Труды XXV Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физи-*

ка — 2021», 4–8 октября 2021 г., ГАО РАН. Санкт-Петербург, 2021. С. 143–146.

Кардашова Н. Н., Борисевич Т. П., Петерова Н. Г., Лесовой С. В. Выброс корональной массы 27.04.2003 и эволюция активной области NOAA 10338 по наблюдениям на микроволнах // *Астрономический журнал*. 2008. Т. 85, №5. С. 460–470.

Саломонович А. Е. Радиоизлучение Солнца на волне 8 мм // *Астрономический журнал*. 1962. Т. 39, № 2. С. 260–269.

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

Топчило Н. А. Радиорадиус Солнца на волнах 0.82 и 1.35 см // *Труды Астрон. Обс. ЛГУ*. 1987. Т. 41. С. 143–155.

Топчило Н. А. Измерение магнитных полей спокойных протуберанцев в радиодиапазоне на РТ-22 КрАО (1987–1993 гг.) // *Изв. КрАО*. 2007. Т. 103. С. 222–232.

Nagnibeda V. G., Piotrovitch V. V. Solar brightness distribution and its variability at 3 mm wavelength // *Solar Phys*. 1994. Vol. 152. P. 175–180.

Solovyev G. N., Rozanov B. A., Ivanov V. N., et al. Solar observations with Radio Telescope RT-7.5 MVTU / In: “Topics in Radioelectronics and Laser System Design”. Florida: CRC Press, 1992. P. 166–177.

White S. M., Iwai K., Phillips N. M., et al. Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): fast-scan single-dish mapping // *Solar Phys*. 2017. Vol. 292, Iss. 7. id. 88.