

О РАЗВИТИИ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА на РАДИОТЕЛЕСКОПАХ РТ-32 ИПА РАН

Топчил Н.А.¹, Рахимов И.А.², Андреева Т.С.², Михайлов А.Г.², Топчил Н.А.², Петерова Н.Г.³¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, ² ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ³ СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Дано описание новых методик картографирования Солнца, реализуемых на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» ИПА РАН начиная с апреля 2024 г. Приведены результаты наблюдений Солнца, выполненных в период с апреля по июль 2025 г. на радиотелескопе РТ-32 в обс. «Светлое» с использованием метода стандартного кругового сканирования [1].

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании микроволнового излучения Солнца радиотелескопы РТ-32 ИПА РАН принимают участие с 1996 г, почти с момента своего создания. Первоначально участие ограничивалось наблюдениями солнечных затмений, которые к настоящему времени охватывают уже два 11-летних цикла солнечной активности (1999-2022 гг.). Однако солнечные затмения являются редким специфическим видом наблюдений, состоящим из последовательного набора слежений за покрытием/открытием Луной отдельных участков Солнца. И для полноценного исследования Солнца как достаточно протяженного, неоднородного и весьма переменного источника радиоизлучения, необходимо также проводить регулярное картографирование как диска Солнца, так и его корональных областей. Поскольку исходное программное обеспечение центрального управляющего компьютера радиотелескопа не имело такого функционала, в 2024 г. была поставлена задача создания специализированного матобеспечения для наблюдения Солнца. Запланирована реализация двух методов картографирования – растрового для центральных областей диска Солнца и кругового – для прилимбовой зоны. Последнее наиболее перспективно для наблюдений на РТ-32. Круговое сканирование реализовано в двух вариантах – квазикруговое и стандартное круговое сканирование.

ВНЕЗАТМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА В ИПА РАН

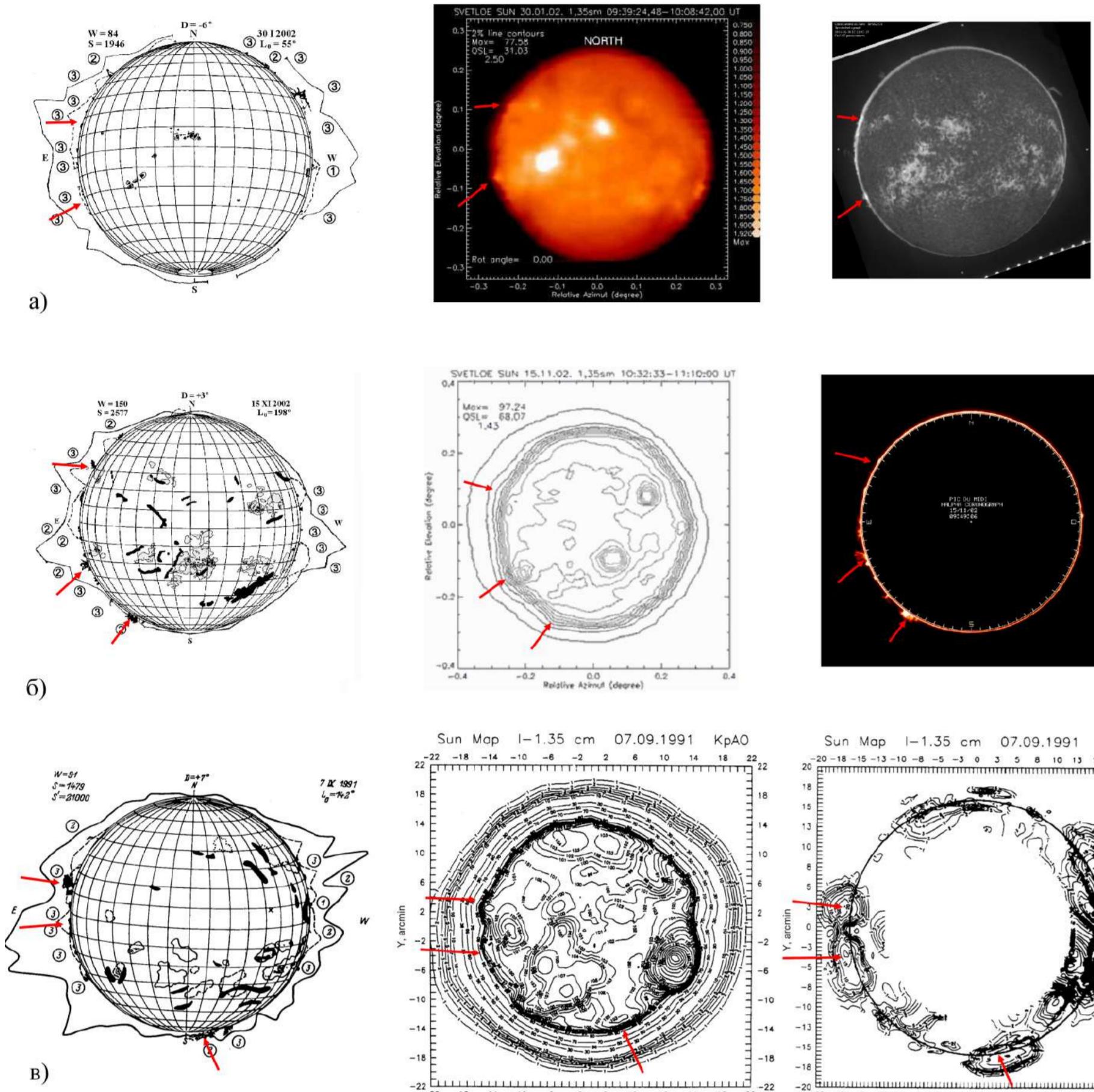


Рис. 1. Сравнение наблюдений Солнца на РТ-32 ИПА РАН с наблюдениями на РТ-22 КрАО на волне 1.35 см. а, б – две карты, полученные в 2002 г. на РТ-32 в обс. «Светлое», методом растрового картографирования, с соответствующими изображениями активности Солнца по материалам блога. «Солнечные данные» и снимками лимба Солнца в линиях Ca II и Hα. в – карта Солнца, полученная в 1991 г. на РТ-22 КрАО методом растрового картографирования, и карта прилимбовой зоны, полученная с помощью кругового сканирования. Красными стрелками отмечены источники, видимые над лимбом Солнца.

НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РТ-32 МЕТОДОМ КВАЗИКРУГОВОГО СКАНИРОВАНИЯ (по материалам [2,3])

На первом этапе работы (апрель 2024 г. – февраль 2025 г.) на РТ-32 в обс. Светлое был реализован более простой в исполнении, но менее эффективный дискретный вариант кругового сканирования – квазикруговое сканирование, когда телескоп последовательно отслеживает ряд точек, расположенных по кругу относительно центра диска Солнца. Для видимого радиуса Солнца $\sim 16'$ и ширины диаграммы направленности (ДН) $\sim 4'$ минимальное количество точек слежения на скане в районе лимба Солнца ~ 50 . Для построения полной карты Солнца использовались круговые сканы с радиусами в диапазоне примерно от $3'$ до $24'$. Дополнительно для исследования источников в прилимбовой зоне строились карты Солнца с удаленной крупномасштабной фоновой составляющей (уровнем спокойного Солнца) для радиусов в диапазоне от $8'$ до $24'$.

На рис.2 представлен пример использования квазикругового сканирования для построения карты Солнца 22 мая 2024 г. Сканирование выполняется в картинной плоскости с центром координат, совпадающим с центром диска Солнца. В прямоугольных координатах ось X направлена вдоль направления от точки востока (E) к точке запада (W) Солнца, а ось Y в направлении от точки юга (S) к точке севера (N). В цилиндрической системе угол ϕ отсчитывается от положительного направления оси X против часовой стрелки. Отрицательные значения ϕ означают поворот по часовой стрелке. Сканирование начинается в точке юга и происходит против часовой стрелки до выполнения полного оборота ДН вокруг Солнца. Затем происходит переход к следующему радиусу. Сканирование идет от малых радиусов к большим. Полное время съемки карты занимает примерно 2.5 часа. Частота регистрации отсчетов с приемника 1 отсчет/сек. Полный набор снятых отсчетов (ненормированных) представлен на рис.2а. На рис.2б отдельно представлен скан по оптическому лимбу Солнца ($R=R_{\text{Sun}}=15.826'$). Поскольку процедура сканирования состоит в быстром перемещении (перегоне) ДН в требуемую точку и слежении в течение заданного времени (здесь 4 сек), скан имеет характерный «ступенчатый» вид. Результирующий отсчет сигнала для точки наблюдения получается путем усреднения сигнала за время фазы слежения. Поскольку перегон ДН програмно не регулируется полная длительность скана переменна, а результирующие отсчеты расположены равномерно по координатам, но неравномерно по времени.

Для построения карт отсчеты нормировались к уровню спокойного Солнца в центре диска (сигнал в центре диска Солнца с поправкой на активность в этом месте). Набор нормированных сканов с радиусами $R=R_{\text{Sun}} \pm 0$ (зеленая кривая), $0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$ \times HPBW, представлен на рис.2в (HPBW – ширина ДН по половине мощности).

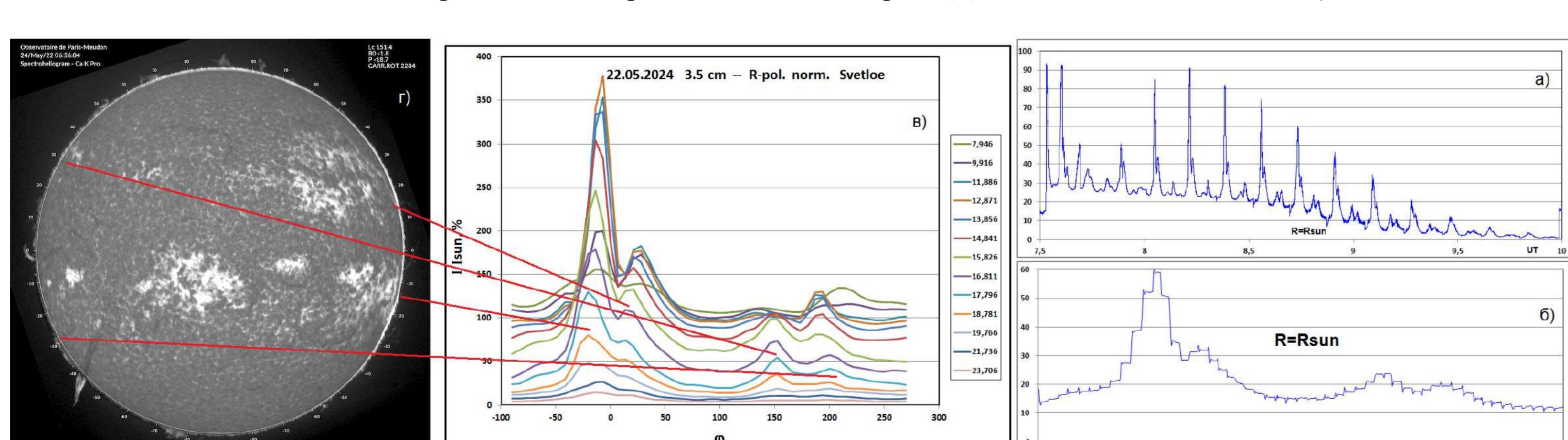


Рис. 2. Пример квазикругового сканирования на телескопе РТ-32 ИПА РАН (обс. Светлое) на волне 3.5 см с шагом $\sim 7'$ (\sim HPBW/2) вдоль сканов. а, б – исходные записи; в – нормированные круговые сканы; г – вид Солнца в линии Ca K в день наблюдения 22.05.2024 г. На сканах хорошо видно наличие источников излучения на диске и в прилимбовой зоне, связанных с активными областями Солнца (соответствующие показаны красными линиями).

На данном этапе внедрения новых режимов сканирования, были проведены пробные наблюдения (рис.3) с целью определения типов доступных для наблюдения объектов и точности их измерения.

На массиве наблюдений из 11 карт (см. рис. 4 на следующей странице постера) было продемонстрировано, что заметная активность наблюдается, не только на диске Солнца, но и далеко за лимбом. Большинство наблюдаемых объектов вблизи лимба связаны с активными областями и их пятнами источниками на диске Солнца или горячими (вспышечными) петлями над ними, а также холодными протуберанцами.

Примеры карт для источников разного типа, полученные на РТ-32 в обс. Светлое на волне 3.5 см представлены на рис. 5-8. Полученные карты сопоставлялись с изображением Солнца в других диапазонах длин волн (УФ, Hα, Ca и др.) и на других инструментах (SRH, РАТАН-600, SDO и др.) и показали хорошее взаимное соответствие отдельных структурных деталей изображений в разных диапазонах. Для сравнения использовались изображения максимально близкие по времени к времени съемки карт на РТ-32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топчил Н.А. Автоматизированные наблюдения Солнца. II. Методы наблюдений // Вестник ЛГУ. - 1983. - № 1. - С. 99-110.
2. Топчил Н.А., Рахимов И.А., Андреева Т.С., Петерова Н.Г. Результаты тестовых наблюдений прилимбовой зоны Солнца на волне 3.5 см на РТ-32 ИПА РАН // Геомагнетизм и Аэрономия. 2025. № 8. (в печати).
3. Рахимов И.А., Андреева Т.С., Михайлов А.Г. Топчил Н.А., Петерова Н.Г. Круговое сканирование прилимбовой зоны Солнца по наблюдениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА РАН. Метод и первые результаты // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 73. С. 3–10. (в печати).

ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ КВАЗИКРУГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РТ-32

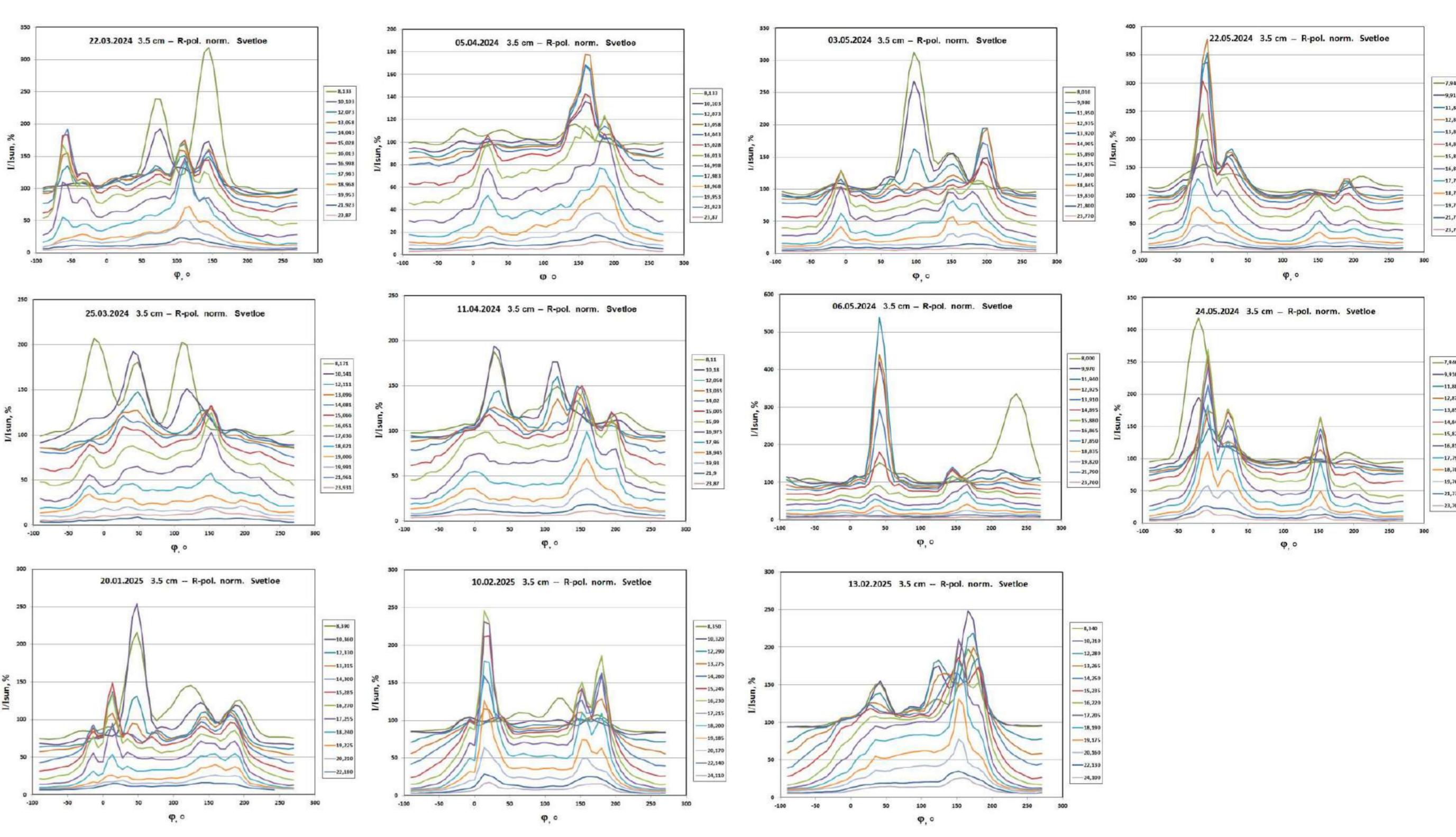


Рис. 3. Примеры полных круговых сканов в диапазоне радиусов 8-23 угл.мин., полученные в апреле – мае 2024 г. и январе – феврале 2025 г. на РТ-32 в обс. Светлое на волне 3.5 см.

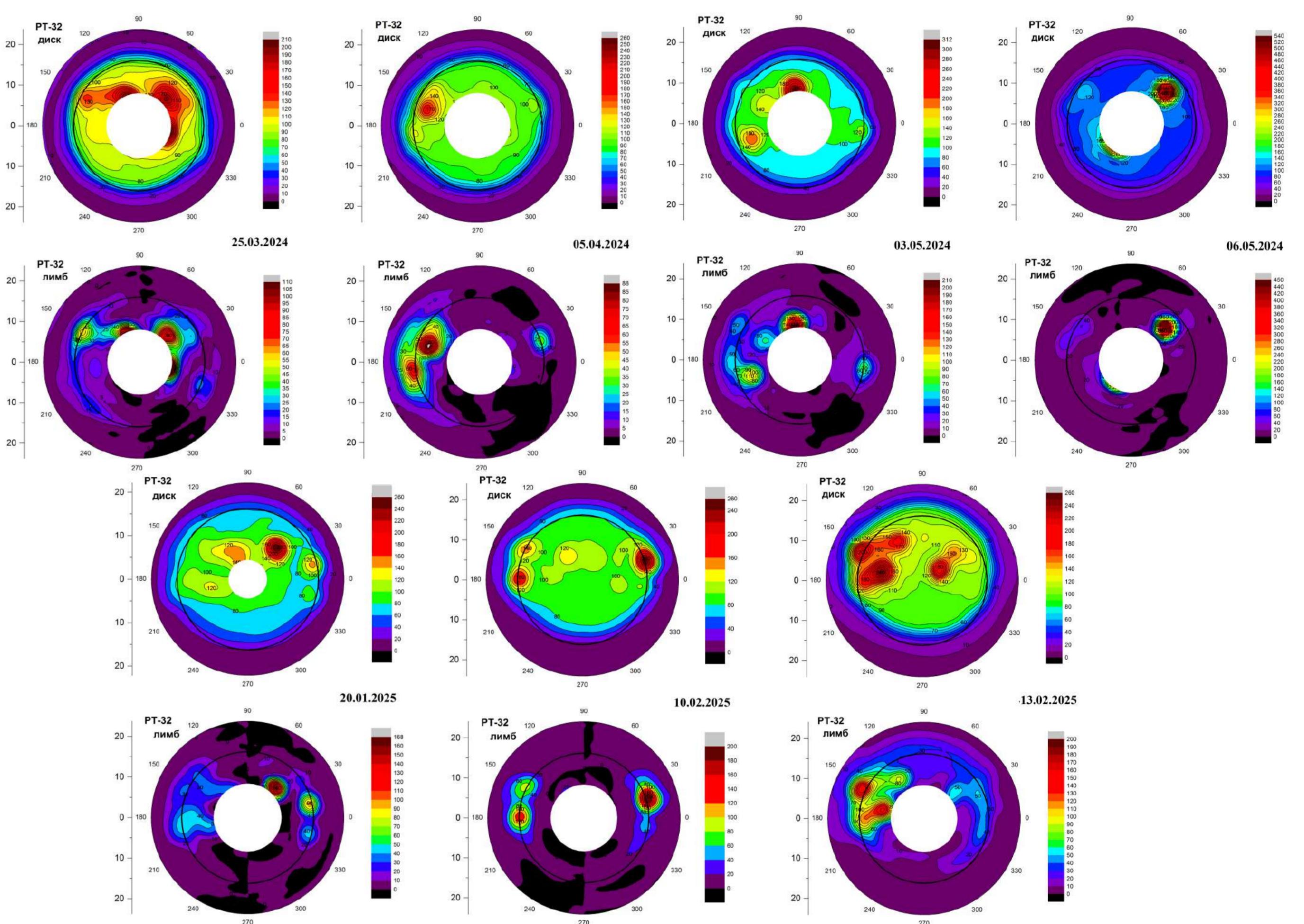


Рис. 4. Избранный набор карт Солнца в полной интенсивности и карты прилимбовой зоны с удаленной фоновой составляющей, полученные в период тестовых квазикруговых наблюдений на РТ-32.

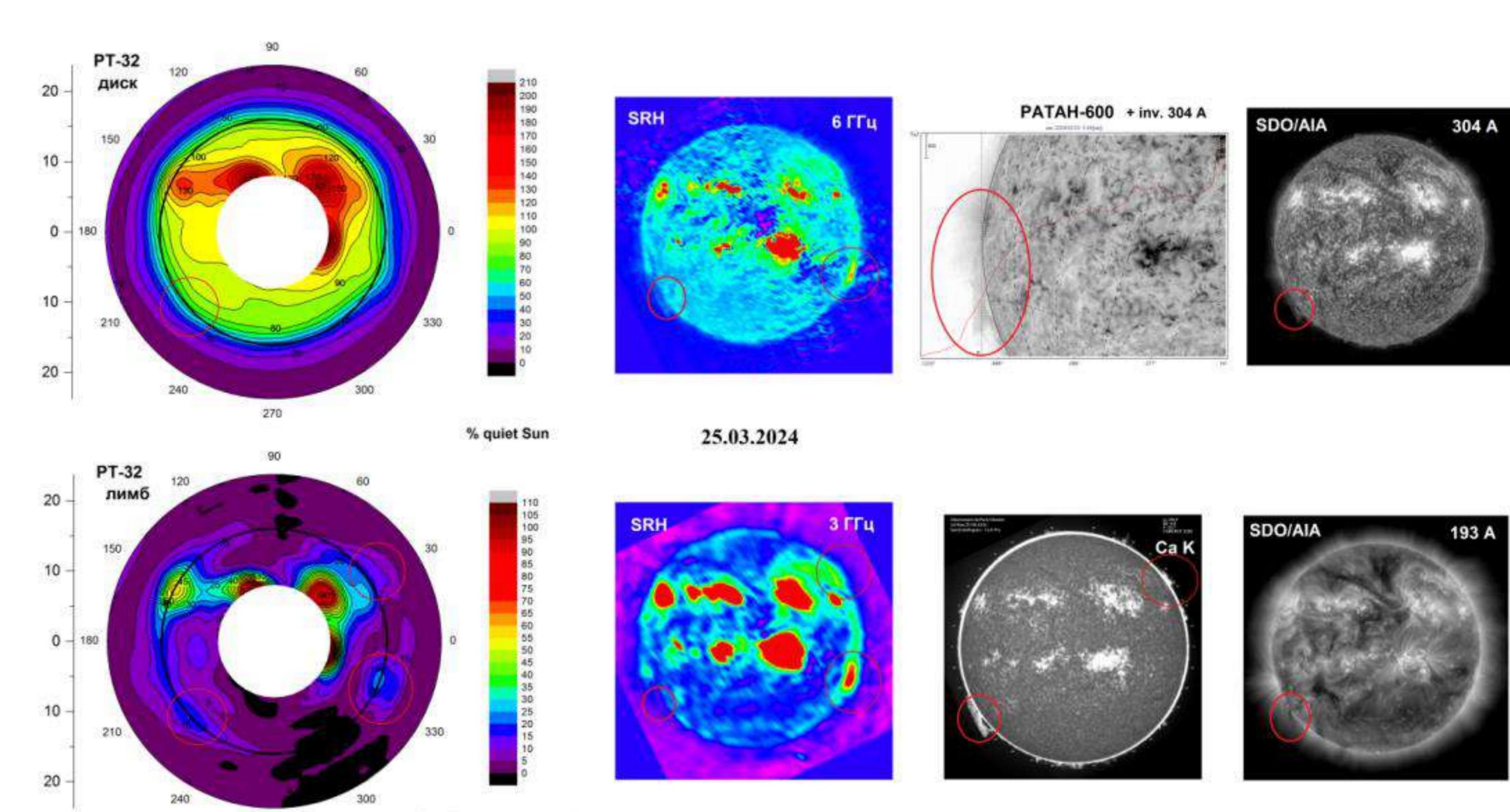


Рис. 5. 25.03.2024. Низкий длинный протуберанец (выделен красной окружностью слева-внизу картинок).

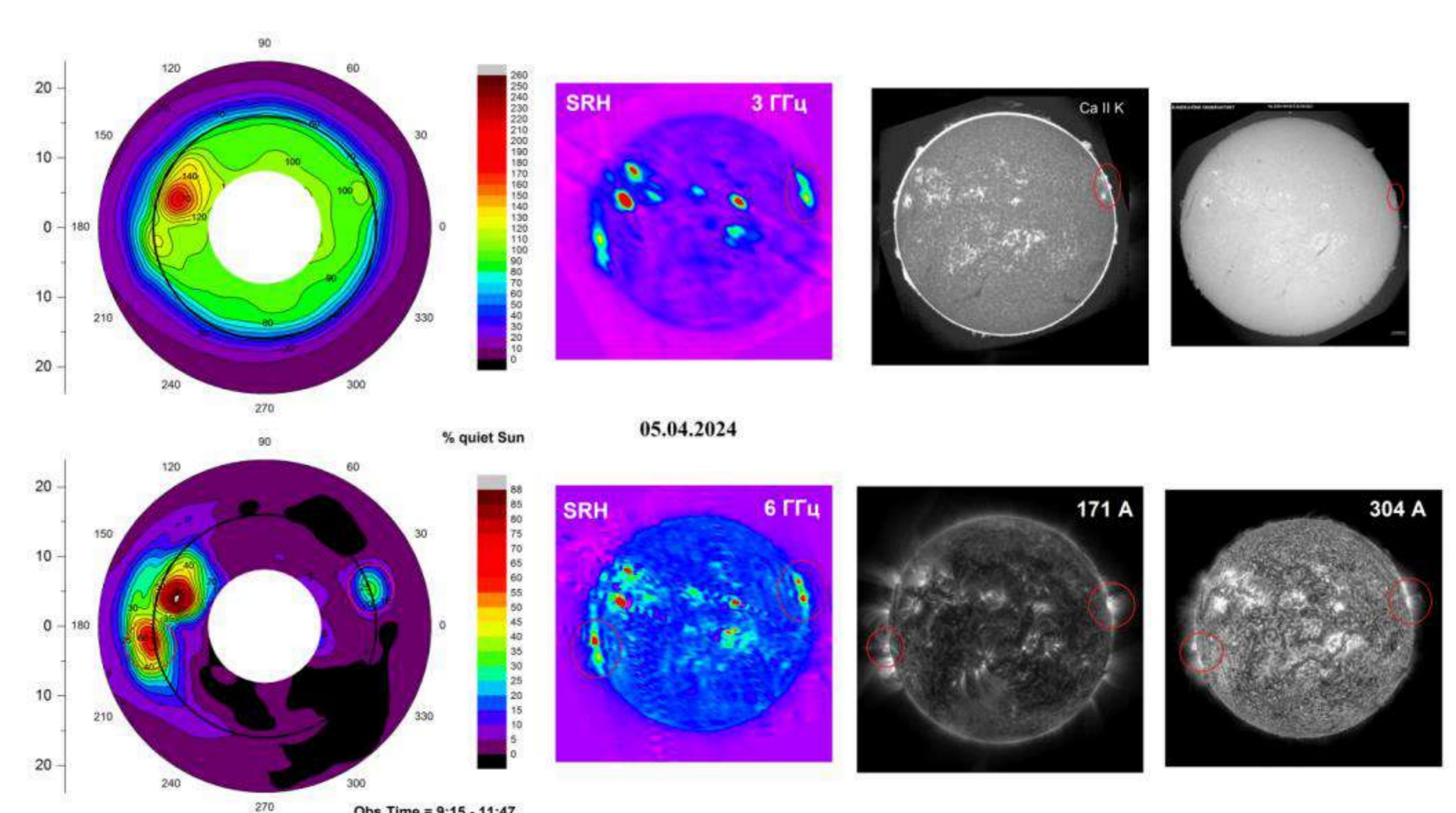


Рис. 6. 05.04.2024. Низкие «вспышечные» петли.

О РАЗВИТИИ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА на РАДИОТЕЛЕСКОПАХ РТ-32 ИПА РАН

Топчilo H.A.¹, Рахимов I.A.², Андреева T. C.², Михайлов A. G.², Топчilo H.A.², Петерова H.G.³

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, ² ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ³ СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

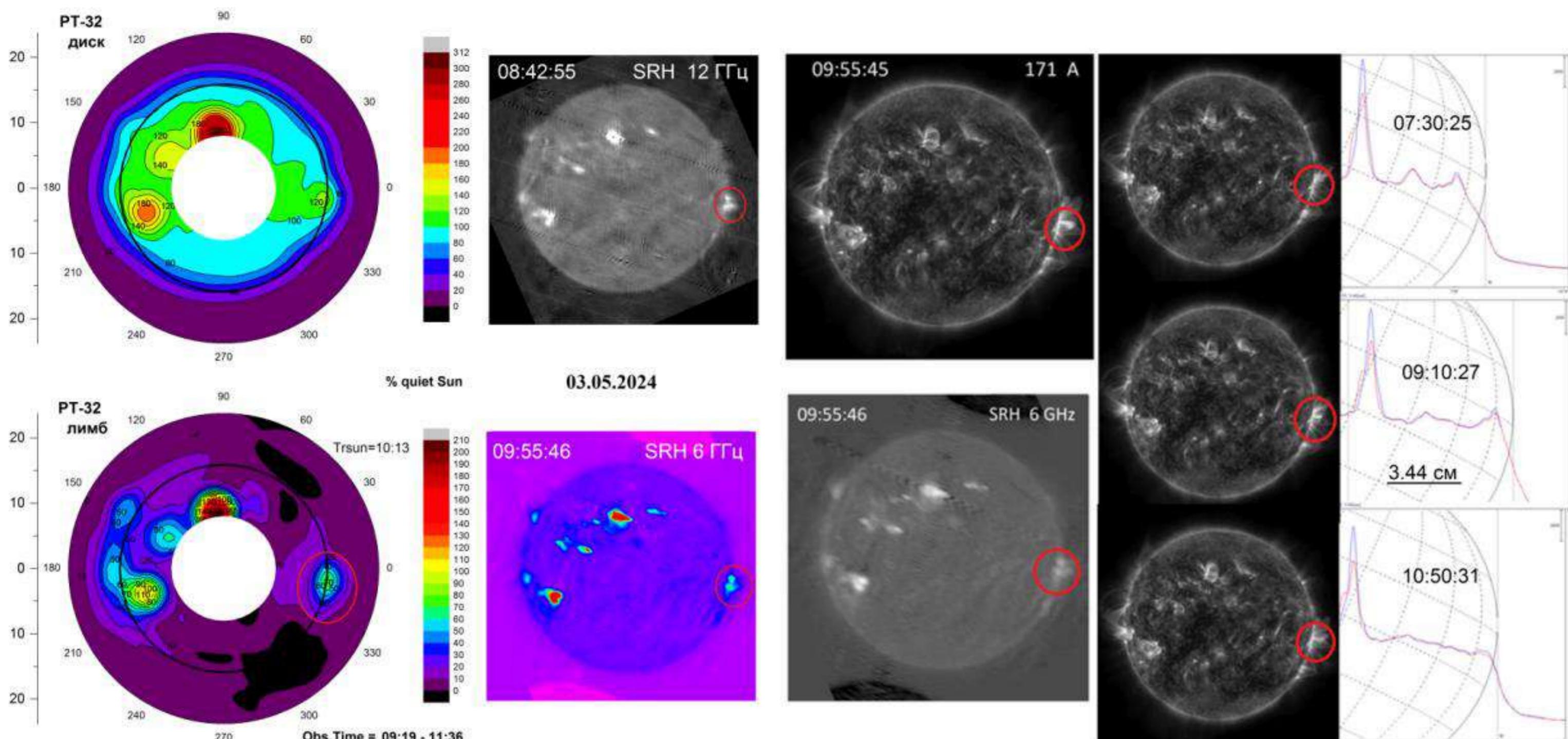


Рис. 7. 03.05.2024. Динамичная вспышечная петля.

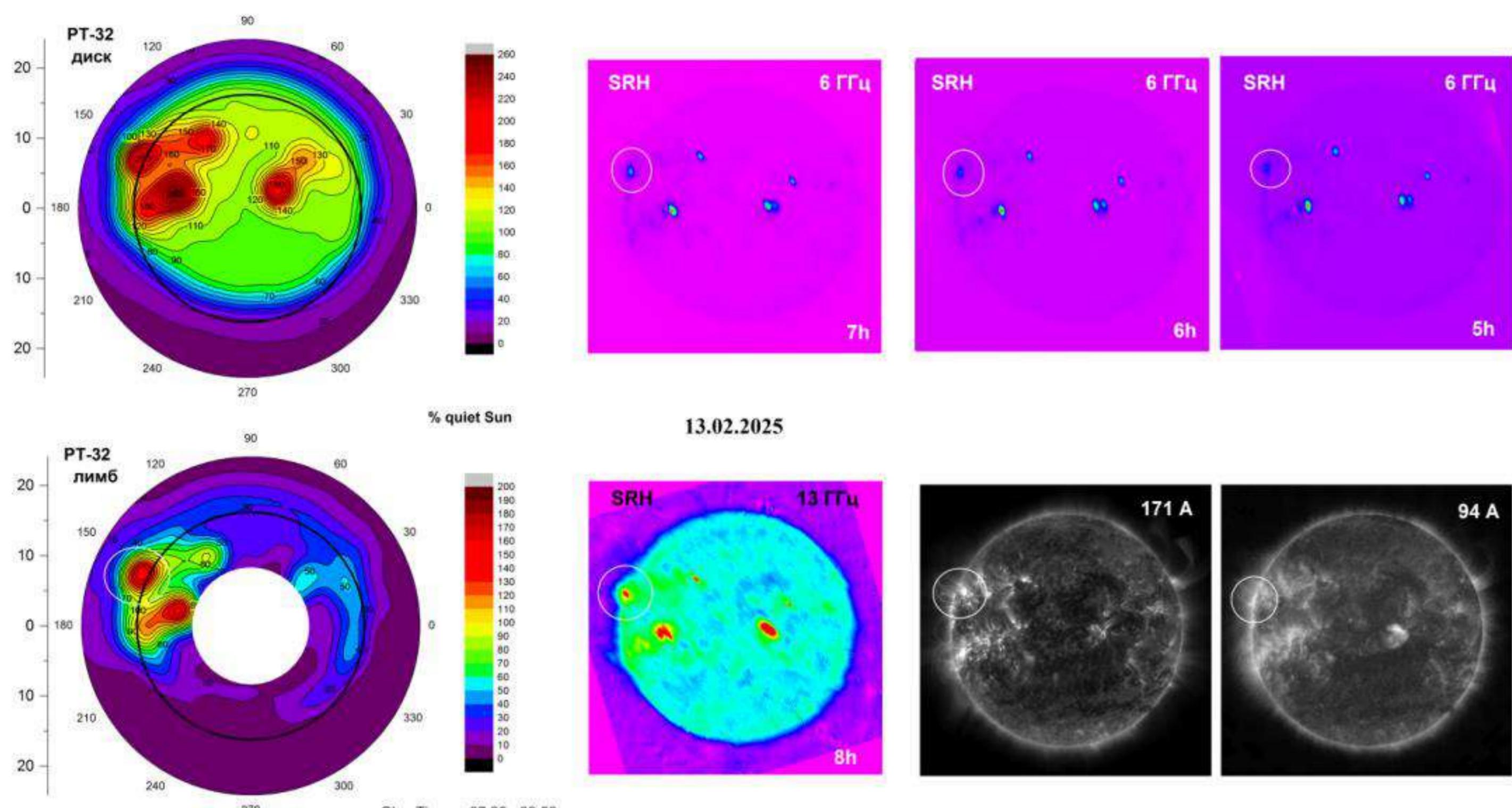


Рис. 8. 13.02.2025. Восход активной области из-за края Солнца.

Реализованное квазикруговое сканирование демонстрирует простую техническую реализацию и хорошие результаты наблюдений. Методика пригодна для масштабирования на любые другие полноповоротные инструменты. Единственный недостаток – метод требует большего наблюдательного времени.

НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА НА РТ-32 МЕТОДОМ СТАНДАРТНОГО КРУГОВОГО СКАНИРОВАНИЯ (New !!)

Изначально ПО радиотелескопов ИПА разрабатывалось для обеспечение слежения за стационарными или медленно движущимися небесными радиоисточниками. Алгоритмы расчета координат ряда таких источников (в том числе и Солнца) входят в стандартное ПО и используются оперативно в процессе наблюдения. Но имеется ряд источников (например, малые планеты, спутники) для которых в ПО отсутствуют алгоритмы расчета координат, например из-за отсутствия заранее известных траекторий. Для наблюдения таких источников наблюдателю предлагается самому заранее рассчитывать координаты источника на весь период наблюдений. Файл с таблицей координат загружается в компьютер и в процессе наблюдения по данным таблицы ПО линейно интерполирует координаты источника на текущие моменты времени. В обоих вариантах наблюдений специальная процедура сканирования на этом уровне ПО не предусмотрено.

Но во втором варианте можно создать ложный источник, координаты которого немного отличаются от координат наблюдаемого источника (в данном случае Солнца) таким образом, что образуется любая требуемая траектория относительно центра диска Солнца (в данном случае окружность). При этом формально телескоп просто следует за источником. Только источник движется по сложной траектории.

В данном методе есть определенные ограничения – физическая скорость движения телескопа во время такого “слежения” на всей траектории не должна превышать максимальной разрешенной скорости слежения, а координаты источника должны быть рассчитаны достаточно часто по времени, чтобы реализуемая ломаная траектория движения достаточно точно аппроксимировала требуемую кривую. В нашем случае окружность аппроксимируется правильным многоугольником. Оба эти ограничения не позволяют очень сильно сократить время картографирования.

Тем не менее такое круговое сканирование (можно его назвать обычным или стандартным) оказывается значительно более эффективным по сравнению с квазикруговым сканированием, поскольку не теряется время на перестановку телескопа от точки к точке (рис. 26). Так время снятия полной карты до радиуса 24' уменьшается с 2.5 часа до менее 1 часа. Кроме того, все точки на стандартном круговом скане относятся к разным положениям ДН, т.е. лучше воспроизводится форма источника, особенно, его максимум и края (рис. 9).

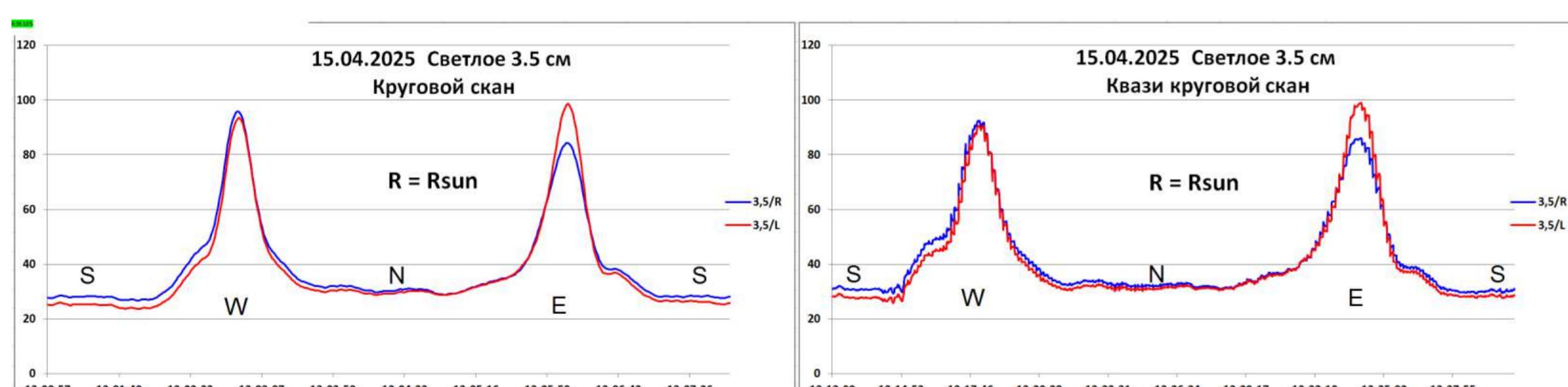


Рис. 9. Сравнение последовательных записей сканов, выполненных методом стандартного кругового сканирования (слева – гладкие кривые) и квазикругового сканирования (справа – скачкообразные кривые). Количество независимых точек (углов) при стандартном круговом сканировании – 423, при аналогичном квазикруговом сканировании обычно 52 (как на рис. 26), но здесь за счет значительного увеличения времени наблюдения увеличено до 209, чтобы продемонстрировать, что принципиально результаты очень близки. Красные кривые – левая поляризация, синия – правая.

Возросшая скорость сканирования во многих случаях позволила получать по 2-3, а иногда 4, полные карты в день. Основным ограничивающим фактором наблюдений при этом является загруженность радиотелескопа плановыми наблюдениями не солнечной тематики. Скорость регистрации полных карт составляет ≈ 1 карта/час (3.5 минуты на полный скан около лимба).

Дальнейшее повышение скорости картографирования можно добиться сокращением числа круговых сканов. Если ограничить наблюдения только прилимбовой зоной ($\pm 3'$ относительно лимба, $\pm 0.75^*$ HPBW на 3.5 см), которая представляет для нас наибольший интерес, то время снятия карты можно сократить примерно вдвое, до 1 карта в ≈ 25 минут (рис. 10). Если достаточно регистрировать только одно полушарие (западное или восточное), что часто бывает при асимметричной активности полушарий Солнца, то время сканирования сокращается до 1 карта в 13 минут. В предельном случае, когда нужно регистрировать только один конкретный источник, достаточно сделать вокруг него мини карту с диапазоном углов в четверть окружности, 1 карта в 6 минут, или 1/8 (1 карта в 3 минуты).

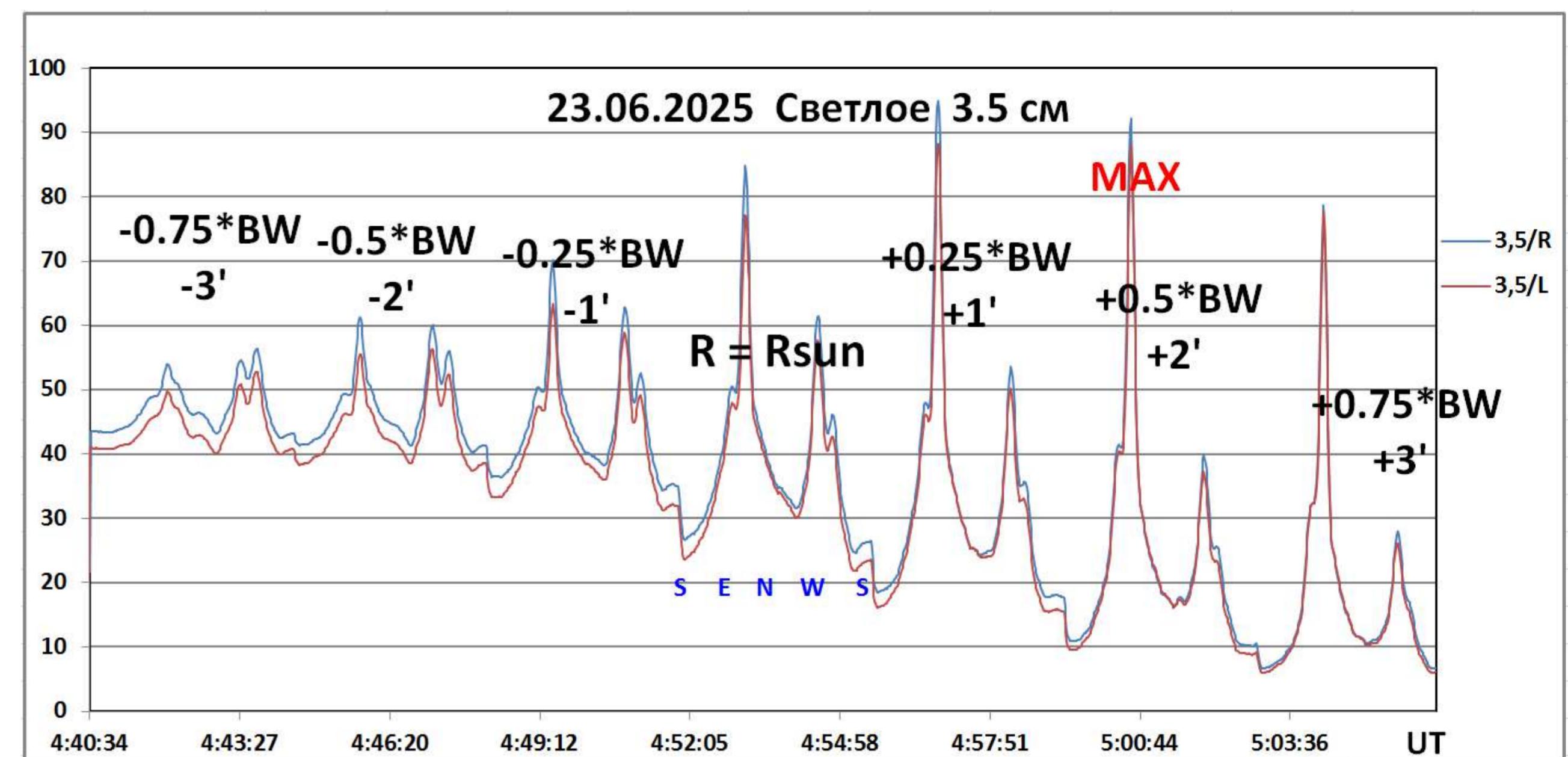


Рис. 10. Пример кругового сканирования прилимбовой зоны 23.06.2025 в диапазоне высот $\pm 3'$ (7 сканов с шагом в 1'). Величина сигнала на рисунке не нормирована.

В наблюдении 23.06.2025 было сделано последовательно 4 карты прилимбовой зоны (сканы на рис. 10 относятся к первой из них). Построенные по записям сканов карты в полной интенсивности и с удалением крупномасштабного фона приведены на рис. 11.

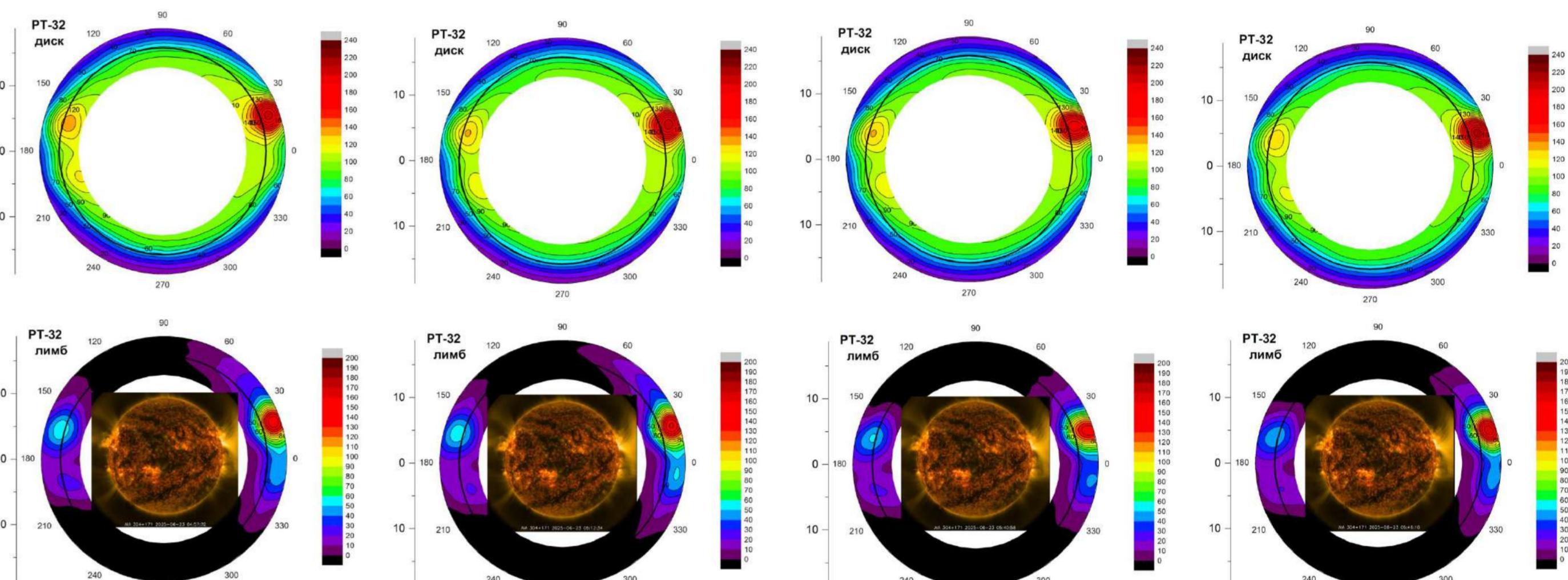


Рис. 11. Пример использования кругового сканирования для построения карт прилимбовой зоны 23.06.2025 в диапазоне высот $\pm 3'$ (7 сканов). Из-за наличия высокого источника здесь желательно было бы добавить по крайней мере еще один скан с $R = R_{\text{Sun}} + 4'$. Величина сигнала на картах нормирована к уровню спокойного Солнца в центре диска. Полная карта Солнца приведена на рис. 12. В нижний ряд карт вмонтированы изображения, полученные на SDO/AIA в моменты близкие к среднему времени наблюдения карт.

Работы по реализации стандартного кругового сканирования начались в середине апреля 2025 г., а с мая 2025 г. начато его систематическое применение (пока еще в тестовом режиме). Его использование позволило значительно ускорить процесс картографирования. Значительно расширена наблюдательная база (более 30 карт с мая-июлем). Увеличен диапазон регистрируемых высот (с 8 до 16 угловых минут над лимбом Солнца). В большинстве случаев регистрировался полный диск Солнца.

По сравнению с первым этапом, когда разрабатывалось квазикруговое сканирование, солнечная активность заметно выросла и благодаря более длинному периоду наблюдений удалось зарегистрировать большое количество высоких петельных структур разного типа. На рис. 12 приведены наиболее интересные примеры новых наблюдений. Одновременно наблюдается также большое количество низкорасположенных объектов. Пока не обработан весь объем наблюдений и не рассмотрена их временная динамика типизации структур остается чисто визуальной характеристикой.

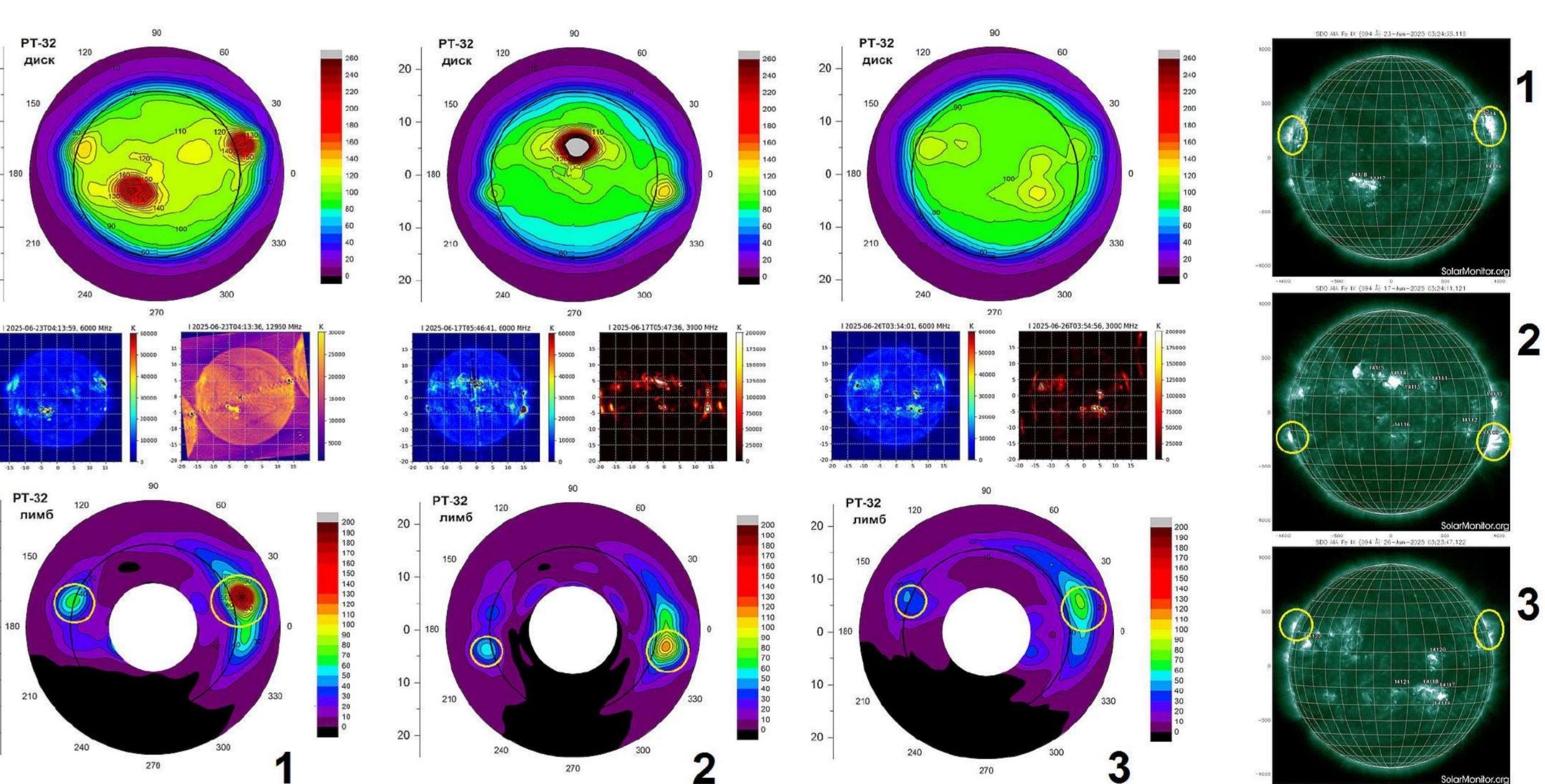


Рис. 12. Примеры источников петельного типа. Представлены полные карты Солнца в полной интенсивности и карты прилимбовой зоны с предварительно удаленной фоновой составляющей (константы), полученные с помощью стандартного кругового сканирования, и их сопоставление с наблюдениями на Сибирском Радиогелиографе и SDO/AIA (094 Å). Крупные окружности справа – высокие петли. 1 – Вспышечные петли (23.06.2025), 2 – Активные петли (17.06.2025), 3 – Спокойные петли (26.06.2025). Мелкие окружности слева – низкие петли.

Крупные холодные высокоширотные протуберанцы в текущем периоде были, но нам они не попадались, а мелкие и раздробленные теряются на фоне активности (Рис. 13).

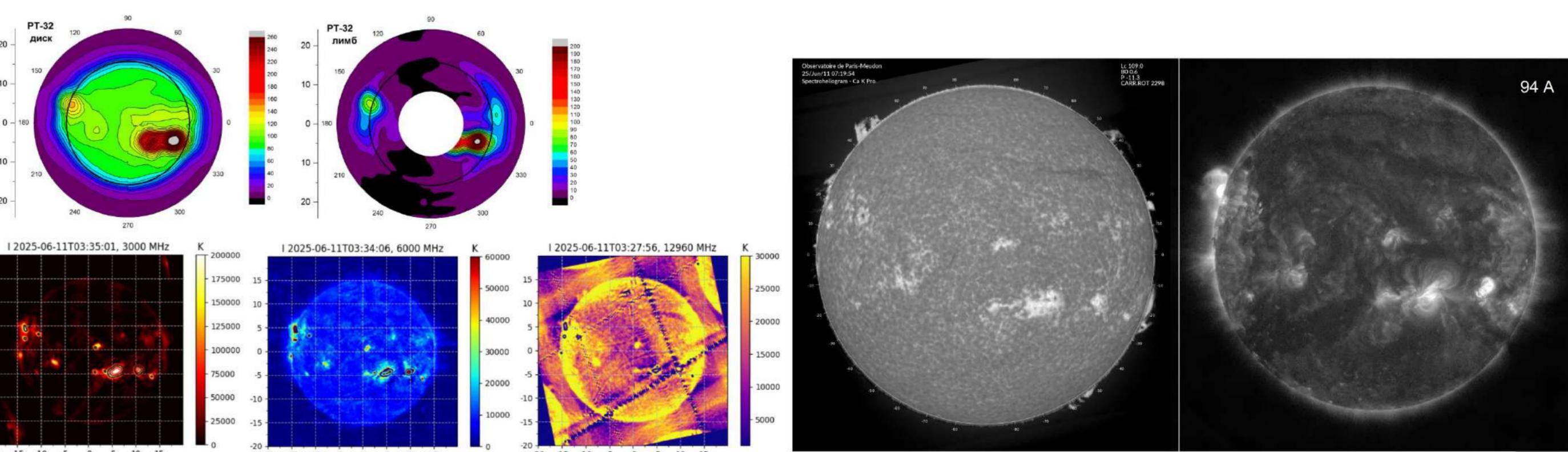


Рис. 13. Пример наблюдения протуберанцев 11.06.2025. На Сибирском Радиогелиографе протуберанцы видны на 12960 МГц. На РТ-32 на 3.5 см хорошо видны только высокотемпературные петли.

Продолжается качественный анализ большого массива наблюдательных данных, полученных в текущем наблюдательном цикле. Начата разработка методов обработки полученного материала с целью выделения фоновой активности в зонах активности Солнца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Реализованные на РТ-32 ИПА РАН методики стандартного кругового сканирования позволили значительно увеличить скорость выполнения картографирования Солнца.

2. Подтверждены качественные результаты наблюдений Солнца на волне 3.5 см, полученные ранее с помощью квазикругового сканирования, что и следовало ожидать, учитывая близость использованных методик наблюдения.

3. Для качественного анализа наблюдений требуется исследование динамики наблюдаемых объектов с привлечением данных других частотных диапазонов.