

УДК 520.272, 523.9

ТОНКАЯ СТРУКТУРА КОРОНЫ ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ С ВЫСОКИМ ЧАСТОТНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2024 г. М. К. Лебедев*, В. М. Богод, Н. Е. Овчинникова

*Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН (СПбФ САО РАН),
Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: m.k.lebedev@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 27.05.2024 г.

Наличие непрерывных процессов охлаждения и нагрева — важное условие, определяющее существование солнечной короны, для которой характерны температуры в несколько миллионов кельвинов. На эти процессы могут оказывать существенное влияние мелкомасштабные корональные образования, которые в значительной мере определяют тепловой баланс короны и возмущения солнечного ветра. Наблюдения поляризованного излучения с высокой чувствительностью позволяют оценить сложную структуру магнитных полей, которые накапливают энергию, необходимую для возбуждения корональных эруптивных явлений, всплесков и вспышек. Однако на больших высотах корона становится оптически тонкой, и ее наблюдения представляют собой большую проблему, требующую использования инструментов с большой эффективной площадью. Многие исследователи отмечают, что область корональной магнитометрии является молодой и затратной для продвижения ввиду того, что экспериментальные наблюдения в оптических диапазонах ограничены низкой плотностью плазмы в короне, высокой температурой, а также недостаточной чувствительностью инструментария. В противоположность этому, в радиодиапазоне достижима более высокая чувствительность. В частности, диапазон 1–3 ГГц оптимален для регистрации весьма слабых корональных структур зарождающей активности, несмотря на ограничения по пространственному разрешению. Для организации радионаблюдений короны на крупном радиотелескопе рефлекторного типа РАТАН-600 был создан широкодиапазонный спектрометр в диапазоне 1–3 ГГц. Он имеет сплошное перекрытие всего диапазона с предельными частотным и временным разрешениями при высокой чувствительности по потоку излучения. В работе приводятся результаты первых серий наблюдений слабых корональных структур, обсуждается их интерпретация по воздействию на тепловые процессы в короне.

DOI: 10.31857/S0023420624060081, EDN: IFTJRA

1. ВВЕДЕНИЕ

В радиоастрономических исследованиях короны в дециметровом диапазоне волн преобладают наблюдения многочисленных радиовсплесков [1, 2] с использованием инструментов различных типов [3–10].

Для мониторинга всплесковой активности используется метровый диапазон длин волн на радиотелескопах с небольшими апертурами, предназначенных для изучения Солнца, как звезды. При этом абсолютное значение уровней всплесков не используется. В метровом диапазоне работают также такие крупные инструменты

с повышенным разрешением, как LOFAR [6], радиогелиограф в Нансе [7], MUSER (ранее CSRH) [9].

Большое разнообразие активных явлений в солнечной короне стало интенсивно изучаться с началом спутниковых исследований, когда появилась возможность сопоставления данных наземных инструментов в радио- и оптическом диапазонах с данными в вакуумном ультрафиолете и рентгеновском диапазоне, что повлияло на ускоренное развитие представлений о структурах в широком диапазоне высот в атмосфере Солнца. Полученные данные дали основания для новых гипотез о роли переходных процессов

в солнечной плазме, которые присутствуют при зарождении активных областей (АО), при предвспышечной и вспышечной активности, генерации разнообразных микровсплесков [11], корональных джетов, импульсивных выбросов корональных масс и могут быть связаны с нагревом короны и ускорением солнечного ветра [12]. Слабые структуры в дециметровом диапазоне были обнаружены в виде длительных микровсплесков на уровне излучения 0.001 солнечных единиц потока (с. е. п.) [13]. Эти микровсплески наблюдались как в поглощении, так и ярком излучении. Их регистрация стала возможной благодаря высокой чувствительности рефлекторного радиотелескопа РАТАН-600. В совместных наблюдениях на РАТАН-600 и радиогелиографе в Нансе была доказана корреляция микровсплесков дециметрового диапазона с всплесками метрового диапазона [14]. Дальнейшие исследования показали, что механизм дециметровых всплесков обусловлен плазменным излучением на 2-й гармонике ленгмюровской частоты [15]. В связи с появлением мощных помех от систем мобильной связи такие наблюдения на РАТАН-600 были прекращены и возобновились после создания помехоустойчивой приемной системы [16].

Следует отметить, что дециметровый диапазон неудобен для наблюдения слабых структур в короне Солнца на крупных инструментах. С одной стороны, для этих наблюдений нужны большая эффективная площадь и равномерная пространственно-частотная характеристика антенны, с другой стороны, необходимо наличие большого динамического диапазона, который позволил бы выделять слабые сигналы на фоне мощного фонового радиоизлучения Солнца. В настоящее время к этим требованиям наиболее приближен радиотелескоп РАТАН-600, в котором при пространственном разрешении 1.5–5' реализуется покрытие полосы частот 1–3 ГГц с динамическим диапазоном до 90 дБ. Такие важные дополнительные качества новой приемной аппаратуры, как относительное частотное разрешение до 10^{-5} и временное разрешение до 8 мс на полный спектр делают РАТАН-600 высокоэффективным инструментом для исследования тонкой спектральной структуры короны.

2. ПРОБЛЕМА ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

В последние десятилетия появилось много публикаций о наблюдении разнообразных мелко-масштабных структур в солнечной короне — как

с помощью внеатмосферных обсерваторий, так и с помощью крупных наземных инструментов, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах, таких как солнечный телескоп DKIST с поляриметром ViSP с апертурой 4.0 м [17], шведский солнечный телескоп диаметром 1 м SST [18] или новый солнечный 1.6-метровый телескоп NST [19]. Обнаружены новые объекты: шлейфы, корональный дождь, различные моды петлевых колебаний и т. д. Данные в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, полученные с помощью космических аппаратов *Yohkoh* [20], *SOHO* [21], *STEREO* [22], *Hinode* [23], *SDO* [24], свидетельствуют о наличии в солнечной короне горячих струй плазмы, которые образуются на всех этапах цикла солнечной активности, как в АО, так и на спокойном Солнце. Такие явления имеют меньший масштаб, чем “обычные” солнечные вспышки и корональные выбросы массы, но обладают схожими с ними свойствами. Определяющая роль в их формировании и динамике принадлежит магнитному полю [25, 26]. Авторы работ [27, 28] указывают на МГД-волны, сопровождающие солнечные вспышки, как на средство диагностики движущего механизма и процессов энерговыделения в эруптивных событиях на Солнце.

Особый интерес вызывают поиски рекомбинационных линий в короне, которые являются уникальным инструментом для изучения физической природы объектов. На Солнце эти исследования в основном ведутся на уровнях фотосферы и хромосферы, тогда как для изучения короны такие возможности сильно ограничены ввиду высокой температуры короны (более 10^6 К), которая препятствует образованию заметных концентраций атомов и молекул.

В дециметровом диапазоне наблюдаются волнока, протуберанцы, спикюлы, радиогрануляционная сетка, яркие струи, джеты, микро- и нановсплески, квазипериодические пульсации (КПП) [29], волны разных типов. Радиоизлучение солнечной короны в дециметровом диапазоне отражает процессы, связанные с пересоединением магнитных полей в короне. Такие процессы, согласно модели Паркера [30], составляют основу существования солнечной короны и происходят повсеместно в структурах различных масштабов, вплоть до нановспышек. Наличие мелкомасштабных структур отражает характер диссипации энергии источника нагрева короны, механизм которого остается невыясненным. Наблюдения в радиодиапазоне с высокой чувствительностью по потоку излучения могут

расширить существующие в настоящее время пределы оценок по нагреву короны (см., например, [31]) ввиду значительной разницы по энергиям излучений рентгеновских и радиочастот.

Диапазон высот солнечной атмосферы, где происходят события типа микро- и нановспышек, соответствует расположению слоев плазменных перезамыканий в шлемовидной структуре магнитных полей на линиях раздела их полярностей. Наблюдения показывают [13, 29, 32], что дециметровый диапазон является предпочтительным для изучения таких событий. Однако в дециметровом диапазоне быстро деградирует помеховая обстановка, что препятствует использованию крупных инструментов при наблюдениях слабых структур в короне Солнца. Ввиду этого применение современных методов спектральной радиометрии [33–38] становится необходимым фактором для развития солнечной радиоастрономии.

РАТАН-600 имеет свою историю наблюдений слабых структур. Это первые наблюдения 1975 г. по хромосферной сетке — т. н. “радиогрануляции” с амплитудой 10^{-4} солнечных единиц потока (с. е. п.) [39] и обнаружение микровсплесков с амплитудой менее 10^{-3} с. е. п. [13]. Обнаружены слабые поглощения вблизи мощных пятен, изменения знака круговой поляризации, ведутся поиски циклотронных линий и рекомбинационных линий водорода [40, 41].

3. ТЕХНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ НОВОЙ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

Радиотелескоп рефлекторного типа РАТАН-600 обладает удачным сочетанием параметров — высокой чувствительностью, многократным перекрытием частотного диапазона при высоком частотном разрешении, возможностью точных измерений поляризации, а также возможностью проведения многократных наблюдений во временных интервалах до 10 мин (до 15 наблюдений в разных азимутах ежедневно). Дополнительные возможности открывает применение нового комплекса — панорамного анализатора радиоспектра (ПАРС) диапазона 1–3 ГГц со спектральным разрешением 8192 частотных канала/ГГц ($\Delta f / f \sim 10^{-5}$), временным разрешением $\Delta t = 8$ мс и высокой чувствительностью по потоку излучения на диске Солнца. Минусами инструмента является умеренное пространственное разрешение и отсутствие возможности получения двумерных карт. Высокая чувствительность по потоку, точность измерения

поляризации излучения и сопоставление с двумерными картами, полученными на спутниковых инструментах, позволяют устранить неоднозначность определения пространственного положения исследуемых структур, вызванную невысоким пространственным разрешением.

Большая эффективная площадь радиотелескопа (приблизительно 1000 м^2 в середине дециметрового диапазона) позволяет достигать высоких параметров по динамическому диапазону (до 90 дБ), что выделяет его из ряда существующих в настоящее время инструментов для исследований солнечной короны. Использование сплошной поверхности радиотелескопа позволяет получать равномерные пространственно-частотные характеристики (ПЧХ). Поскольку антенная система радиотелескопа и приемная система работают совместно, то следует рассматривать их работу с двумя принципиальными фильтрами: ПЧХ антенны и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) радиометрической системы. При этом результат наблюдений представляет собой пространственный спектр объекта, умноженный на ПЧХ радиотелескопа [42].

В настоящее время начаты наблюдения на новой экспериментальной основе [33–38]. Отличительными особенностями этих наблюдений являются высокое частотное разрешение в широком диапазоне частот, большой динамический диапазон, а также использование методов обработки данных, позволяющих реализовать многообъектные режимы наблюдения с выделением слабого сигнала на мощном фоне методом главных компонент [37]. Основные характеристики приемной системы следующие:

- диапазон частот 1–3 ГГц;
- высокое спектральное разрешение (до 0.12 МГц) во всем диапазоне частот;
- пространственное разрешение, позволяющее выделить АО размером $1.2\text{--}3.5'$ на всех частотах;
- сплошное покрытие пространственно-частотной плоскости для реализации высокого динамического диапазона (35–90 дБ).
- возможность изучения динамики процесса в режиме многократного 10-минутного сопровождения выбранного объекта на солнечном диске.

Чувствительность по потоку излучения имеет порядок от 10^{-3} до 10^{-5} с. е. п., что обеспечивает регистрацию как слабых микро- и нановсплесков, так и мощных всплесков, связанных с высокоэнергичными событиями.

Возможности наблюдений в диапазоне 1–3 ГГц ограничены из-за большого количества помех искусственного происхождения (мобильная связь, GPS, микроволновые печи, авиационные радары и т. д.). Очистка данных от помех происходит в три этапа. Для подавления наиболее мощных помех (сигналов от локаторов, мобильной связи и пр.), действующих в известных полосах частот и способных насытить входные усилители [34], в ВЧ приемном тракте установлены аналоговые заградительные фильтры. Использование прямого бездетекторного приема и применение статистических методов цифровой обработки информации [35, 36, 43] позволяют в режиме реального времени выделять и устранять помехи искусственного происхождения. При постобработке данных удаляются помехи, которые не могут быть устранены на первых двух этапах.

Система регистрации хранит в активном архиве данные с временным разрешением 8 мс/спектр и частотным разрешением 1–4 МГц. Система обработки позволяет анализировать данные на наличие различных спектрально-временных структур. Существует также возможность значительного изменения порога чувствительности путем изменения усреднения в широких пределах (по времени 10^3 – 10^4 , по частоте до 10^4), что позволяет развивать методы мультиобъектного приема сигналов, т. е. реализовать прием слабых сигналов на фоне мощного сигнала. Это актуально для солнечной радиоастрономии в связи со сложностью изучения механизмов излучения слабых корональных структур на фоне высокой яркости.

4. ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАТАН-600 ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Поскольку РАТАН-600 относится к крупным рефлекторным системам, то при измерениях яркостной температуры различных объектов следует учитывать его шумовые характеристики, пространственно-частотные характеристики антенной системы и приемно-усилительной аппаратуры, возможности интегрирования по частоте и по времени и др.

Оценка чувствительности может быть проведена по следующей формуле и подтверждается реальными данными [16]:

$$\Delta F = \frac{2k(T_{\text{sys}} + \mu T_{\text{sun}})}{A_{u,v}(f)SR_m},$$

где ΔF — чувствительность радиотелескопа по потоку излучения, $A_{u,v}(f)$ — пропускание пространственно-частотного фильтра, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹ — постоянная Больцмана, $T_{\text{sys}} = T_a + T_{\text{rad}}$ — температура системы, равная сумме температур антенны и радиометра, μT_{sun} — температура входного сигнала от Солнца с учетом рассеяния антенны, $R_m = [(n\Delta f) \cdot (N\Delta t)]^{1/2}$ — радиометрический выигрыш, S — площадь поверхности радиотелескопа (500 – 1000 м²), $n\Delta f$ — полная ширина полосы пропускания, равная произведению числа частотных каналов n на ширину полосы канала $\Delta f = 0.122$ МГц, $N\Delta t$ — время накопления сигнала (0.01 – 10 с), N — число интервалов накопления, $\Delta t = 8$ мс/спектр — временное разрешение.

Для количественной оценки чувствительности рассчитаем для примера условия регистрации одиночного радионановсплеска с яркостной температурой $T_b = 10^6$ К и размерами $1'' \times 1''$. Для волны 20 см выбраны следующие значения параметров: $S = 1000$ м², $n\Delta f = 10$ МГц, $N\Delta t = 10$ с, $T_{\text{sys}} = 150$ К. Оценка шумовой чувствительности радиометра по антенной температуре в отсутствие фонового сигнала от Солнца дает $\delta T = 1.5 \cdot 10^{-2}$ К, а в его присутствии ($T_{\text{sun}} = 6000$ К) — приблизительно 0.6 К. Тогда чувствительность по потоку излучения в системе антенна + радиометр в присутствии фонового сигнала от Солнца составит $\Delta F \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с. е. п.

При оценках чувствительности по яркостной температуре нужно учесть соотношение размера источника и размера диаграммы направленности (ДН). Согласно антенным измерениям на частоте 1500 МГц, ДН РАТАН-600 в системе Южного сектора с Перископом [44] имеет размеры $2'$ по горизонтали и 2° по вертикали ввиду вытянутости апертуры в горизонтальном направлении. В таком случае телесный угол области размером $1'' \times 1''$ составляет $4.6 \cdot 10^{-6}$ от телесного угла участка Солнца, попадающего в ДН. Соответствующая яркостной температуре T_b антенная температура равна 4.6 К. При наблюдениях вспыхивающих структур чувствительность по антенной температуре ухудшается пропорционально увеличению яркости источника и составляет $\Delta T \approx 6$ К. При этом в аппаратуре реализован динамический диапазон 10^9 , что допускает резерв по насыщению в два порядка. Эти расчеты подтверждаются в наблюдениях.

5. ОБРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Большие массивы спектральных данных требуют новых подходов к их обработке. В комплексе ПАРС полное число спектральных каналов в диапазоне 1–3 ГГц составляет 16384 (8192 канала/ГГц). При поляризационных измерениях производится переключение между каналами левой и правой круговых поляризаций с частотой 2 Гц. Продолжительность наблюдения одним сканированием солнечного диска неподвижной ДН радиотелескопа обычно составляет 400 с, что при разрешении 120 полных спектров в секунду дает набор из $400 \times 120 = 48000$ спектров длиной от 256 до 2048 точек каждый, в зависимости от используемого усреднения по частоте. Таким образом, одно наблюдение представляет собой матрицу выборок размером как минимум 48000×256 . Для обработки и анализа многоволновых данных РАТАН-600 используется метод главных компонент, который давно применяется в хемометрике [37, 45, 46] и спектроскопии, в т. ч. для анализа астрофизических данных [47].

Каждый измеренный спектр, содержащий M частотных составляющих, можно представить как точку в исходном M -мерном пространстве данных. Суть метода главных компонент можно описать как приведение облака точек исходных данных к ортогональным главным осям. Вследствие ортогональности новых осей набор данных в новых координатах может быть представлен в виде суммы наборов проекций данных на новые оси — главных компонент. Оси упорядочены так, что дисперсия проекции данных на каждую следующую ось меньше, чем та же величина для предыдущей оси. Таким образом, главные компоненты оказываются упорядочены по доле мощности исходного сигнала, которую несет каждая из них.

Применительно к солнечным радиоданным последовательно выделяются: 1) медленно меняющаяся компонента (спокойное Солнце, тепловое излучение АО, проявляющееся на всех частотах); 2) быстро меняющиеся по времени или частоте компоненты (всплески, синхротронное излучение и т. п.); 3) компоненты гауссовского шума. Компоненты, связанные с остаточными помехами, не устраненными на этапах очистки сигнала в приемной аппаратуре, по мощности могут превышать быстро меняющиеся компоненты, связанные с явлениями на Солнце, однако имеют другой спектральный состав и временную форму. Как правило, такие помехи

представляют собой узкополосные постоянно действующие или импульсные сигналы, или относительно широкополосные сигналы с резко обрывающимся спектром, действующие в течение непродолжительного времени.

Высокое спектральное разрешение приемной системы позволяет идентифицировать процессы в выбранном спектральном диапазоне и определить их многокомпонентную структуру.

6. НАБЛЮДЕНИЯ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА ПАРС

Регистрация слабых активных образований на ярком диске Солнца является важной наблюдательной задачей для всех диапазонов, связанной с фундаментальной проблемой нагрева солнечной короны. Главная сложность заключается в том, что регистрация таких процессов происходит в присутствии мощного фонового радиоизлучения Солнца, что затрудняет наблюдение слабых источников. В радиодиапазоне картина та же, что и в более высокочастотных диапазонах, но квант излучения имеет меньшую энергию и может нести информацию о более слабых значимых процессах. Поскольку чувствительность в радиодиапазоне достаточно высока, есть основания надеяться на эффективность работы методов выделения слабых сигналов на мощном фоне.

В разработке находится режим сопровождения в азимутальных наблюдениях [48], который необходим для изучения временных свойств корональных структур. Кроме того, использование высоких разрешений по частоте и времени позволяет разрабатывать методы устранения помех [36] и реализовать многообъектные режимы наблюдений, т.е. наблюдения слабых объектов на фоне мощных структур. Весьма перспективными с этой точки зрения выглядят методы факторного анализа [37].

За счет большого динамического диапазона и высокого временного разрешения приемной системы комплекса при сканировании Солнца диаграммой направленности антенны вдоль суточной параллели происходит регистрация изменений спектральной плотности потока радиоизлучения на уровне 0.1 с. е. п. в пределах ширины диаграммы. Эти изменения обусловлены активными структурами короны внутри площади, захватываемой диаграммой на каждой частоте.

Ниже приводятся некоторые результаты, полученные в наблюдениях Солнца на комплексе ПАРС.

6.1. Тепловые неоднородности в короне в спектральных радионаблюдениях

Уже первые наблюдения с новым спектральным комплексом на РАТАН-600 зафиксировали существование тепловых неоднородностей с амплитудой колебаний яркости в пределах долей с. е. п. в излучении и в поглощении [38]. На рис. 1 представлены результаты многочастотной обработки наблюдения 27.III.2022 методом главных компонент. На диске Солнца присутствуют две АО — крупная АО в центре диска ($x = -200''$) и восходящая АО на восточном лимбе ($x = -900''$). Прохождение ДН по диску Солнца привязано к магнитограмме НМИ, приведенной на рис. 1а. Там же показаны сканы в интенсивности на частотах от 1100 до 1700 МГц. На рис. 1б,в,г,д показаны спектрограммы интенсивности полного сигнала и его интенсивности за вычетом первой, второй и третьей главных компонент. Данные указывают на наличие тонкой спектрально-пространственной структуры при регистрации слабых сигналов после вычитания мощного фонового сигнала. Следует заметить, что тепловая неоднородность в короне в данном наблюдении отмечается на весьма слабых уровнях (± 0.8 с. е. п.).

В отсутствие вспышечной активности основной вклад в излучение над активными областями дают два механизма: тепловое тормозное излучение и циклотронное излучение. На рассматриваемых частотах плазма над активными областями является оптически толстой по обоим этим механизмам (см., например, [49, 50]). Поскольку неоднородности в спектре регистрируются в широком диапазоне частот, это указывает на наличие в короне относительно холодных и горячих слоев.

6.2. Депрессия в спектре в короне над активной областью

На рис. 2 представлен пример частотных спектров участков Солнца, попадающих в ДН РАТАН-600, измеренных с частотным разрешением 4 МГц в наблюдении 6.XII.2023. На рис. 2а показан спектр при прохождении ДН АО NOAA 13507, 13508, на рис. 2б — спектр неактивного Солнца. На рис. 2а в диапазоне 1500–1700 МГц присутствует депрессия величиной около 1 с. е. п. Нетрудно заметить, что спектр для спокойной короны имеет более гладкую структуру

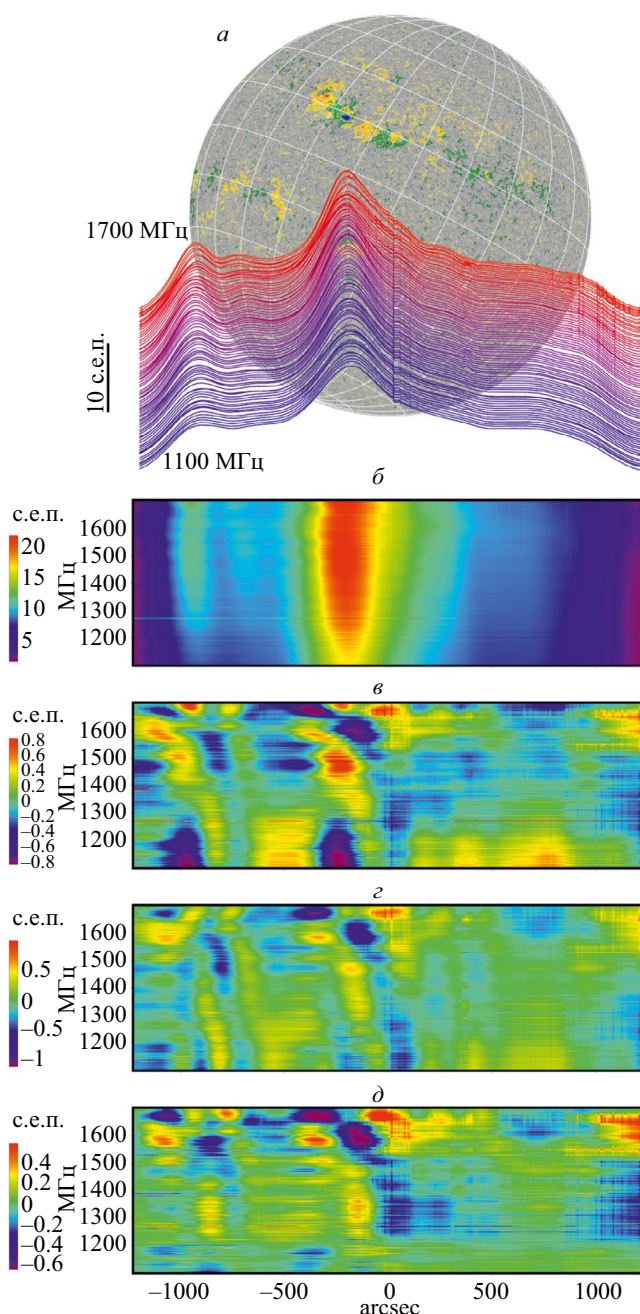


Рис. 1. Наблюдение 27.III.2022; а — магнитограмма НМИ и привязанные к ней сканы РАТАН-600 на частотах от 1100 до 1700 МГц; б — спектрограмма интенсивности; в, г, д — спектрограммы интенсивности за вычетом одной, двух и трех главных компонент.

по сравнению с возмущенной структурой спектра над АО. Спектры типа приведенного на рис. 2б систематически регистрируются в наших наблюдениях. Следует отметить, что существует множество работ, в которых отмечается наличие депрессии в спектре излучения над АО [51–55].

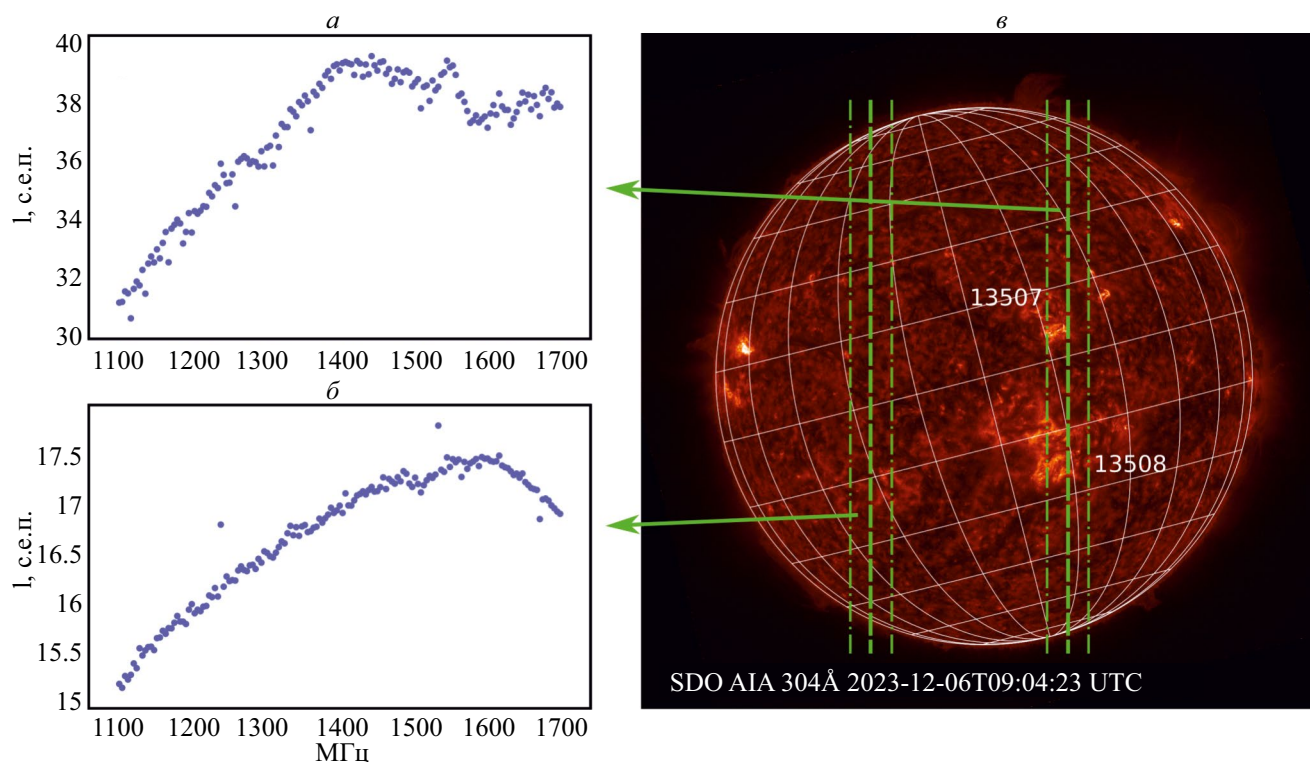


Рис. 2. Депрессия в спектре в короне над АО. 6.XII.2023, время 09:03; *а* — спектр в АО; *б* — спектр в области отсутствия активности; *в* — изображение SDO AIA. Пунктирными линиями показаны положения диаграммы направленности РАТАН-600, соответствующие моментам получения спектров *а* и *б*, а штрих-пунктирными — ширина диаграммы направленности на длине волны 20 см.

В большинстве этих работ данное явление объясняется наличием плотной холодной плазмы в солнечной атмосфере над АО.

На рис. 3 представлены результаты наблюдения 7.II.2024 АО NOAA 13578 вблизи восточного лимба. Приведены результаты измерений в левой (ЛКП) и правой (ПКП) круговых поляризациях. На изображении GONG Na присутствует тонкое волокно с основанием в пятне с сильным магнитным полем, горячее у основания и холодное над нейтральной линией магнитного поля. На спектрограмме ПКП имеется депрессия в области от $-780''$ до $-650''$ в частотном диапазоне 1550–1670 МГц. На фоне депрессии наблюдается узкая линия двойная поглощения на частотах 1590 и 1630 МГц шириной приблизительно 40 МГц.

6.3. Корональный дождь в спектральных радионаблюдениях

На рис. 4 представлены результаты наблюдения 29.I.2024. На западном лимбе наблюдался корональный дождь [56]. Обращает на себя внимание богатая структура спектра за лимбом.

В обеих поляризациях наблюдается узкая линия поглощения на частоте около 1610 МГц, смещающаяся по частоте по мере прохождения корональных петель через ДН радиотелескопа.

На рис. 5 представлены результаты наблюдения 18.VI.2022. Прохождение ДН по диску Солнца привязано к изображению AIA 304 Å (рис. 4а). На изображении виден комплекс активности из трех АО NOAA 13030, 13032 и 13033. В западной части данного комплекса, выделенной белым прямоугольником, наблюдался корональный дождь, что стало понятно из анализа видео, полученного из изображений AIA 304 Å, снятых с каденцией 12 с. На рис. 4в,г,д приведены три кадра из данного видео, соответствующие моментам времени 09:27:05, 09:39:05, 09:51:05, на которых стрелками отмечены некоторые характерные детали. Видны значительные изменения в структуре комплекса активности. Спектрограмма интенсивности за вычетом первой главной компоненты в диапазоне 1100–2900 МГц, показанная на рис. 4б, демонстрирует структуру тепловых неоднородностей в короне.

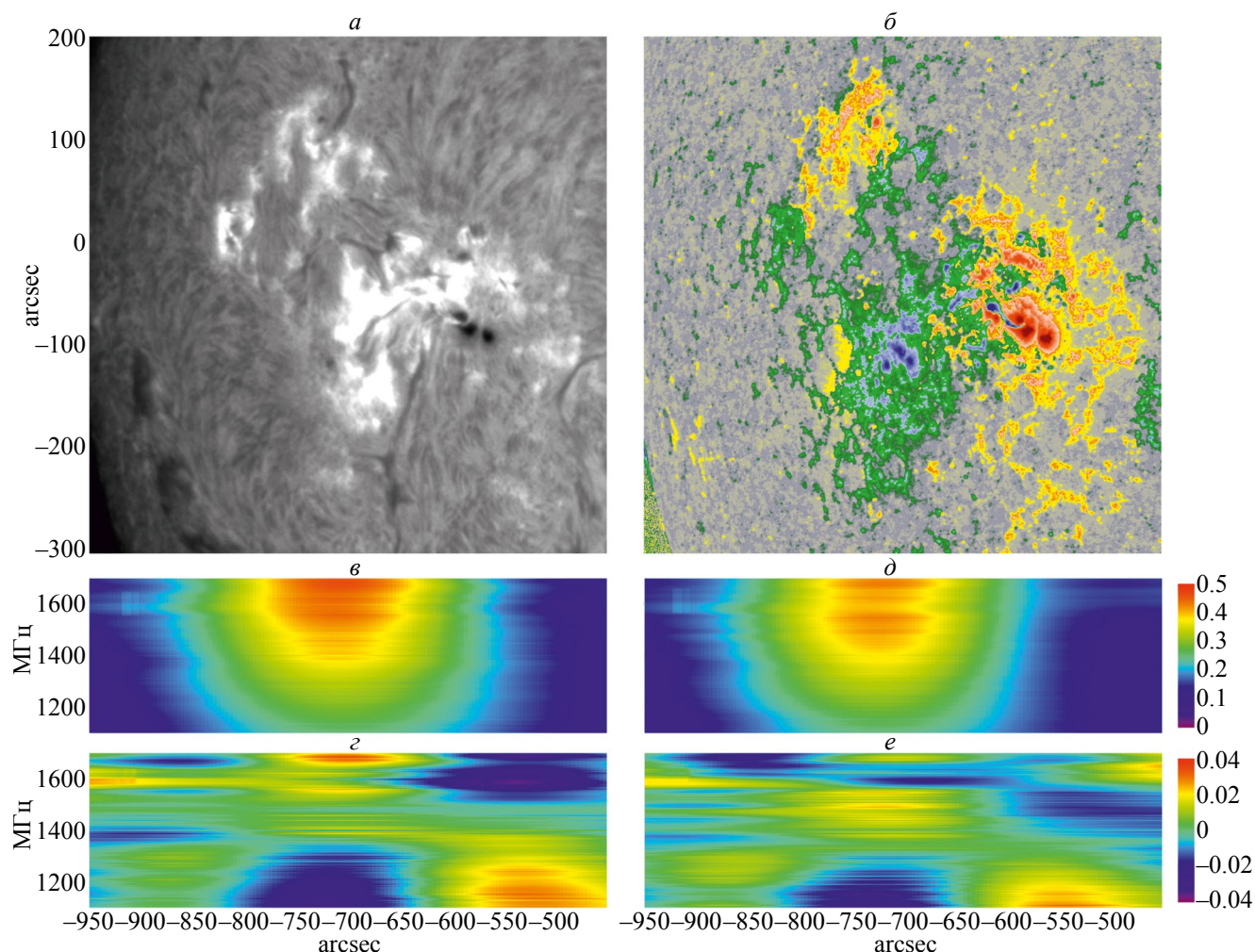


Рис. 3. Наблюдение 7.II.2024. АО NOAA 13576 и 13578 с волокном между ними; *a* — изображение GONG Learmonth ($H\alpha$); *b* — магнитограмма HMI; *v* — спектрограмма ЛКП; *z* — спектрограмма ЛКП за вычетом первой компоненты; *d* — спектрограмма ПКП; *e* — спектрограмма ПКП за вычетом первой компоненты; спектральный диапазон 1100–1700 МГц; горизонтальная ось на всех панелях общая; масштабы *v* и *d*, а также *z* и *e* одинаковые.

6.4. Поглощение в активной области в присутствии волокна

На рис. 6 представлены результаты наблюдения АО NOAA 13030 18.VI.2022. В левой части изображения AIA 304 Å наблюдается часть протяженного холодного волокна, частично перекрывающего АО. На спектрограммах наблюдается система узких линий поглощения в области от 350'' до 600'' на частотах от 1590 до 1690 МГц, смещающихся по частоте по мере прохождения волокна через ДН.

6.5. Протуберанцы на лимбах

На рис. 7 и 8 представлены данные наблюдения протуберанцев на восточном и запад-

ном лимбах над АО NOAA 13584 и NOAA 13564 7.II.2024.

Спектры протуберанцев имеют сложную структуру. Обращает на себя внимание узкополосное излучение далеко за лимбом на тех же частотах (в области 1600 МГц), на которых происходит поглощение в АО на солнечном диске. В спектре излучения АО в правой части рис. 7 наблюдается обширная депрессия. На западном лимбе (рис. 8) на волне 304 Å наблюдается свечение корональных петель над лимбом, а на соответствующих спектрограммах на уровне основания корональных петель наблюдается узкая линия поглощения на частоте 1590 МГц, а на уровне их вершин (1100'' и выше) — излучение на частотах 1600–1700 МГц.

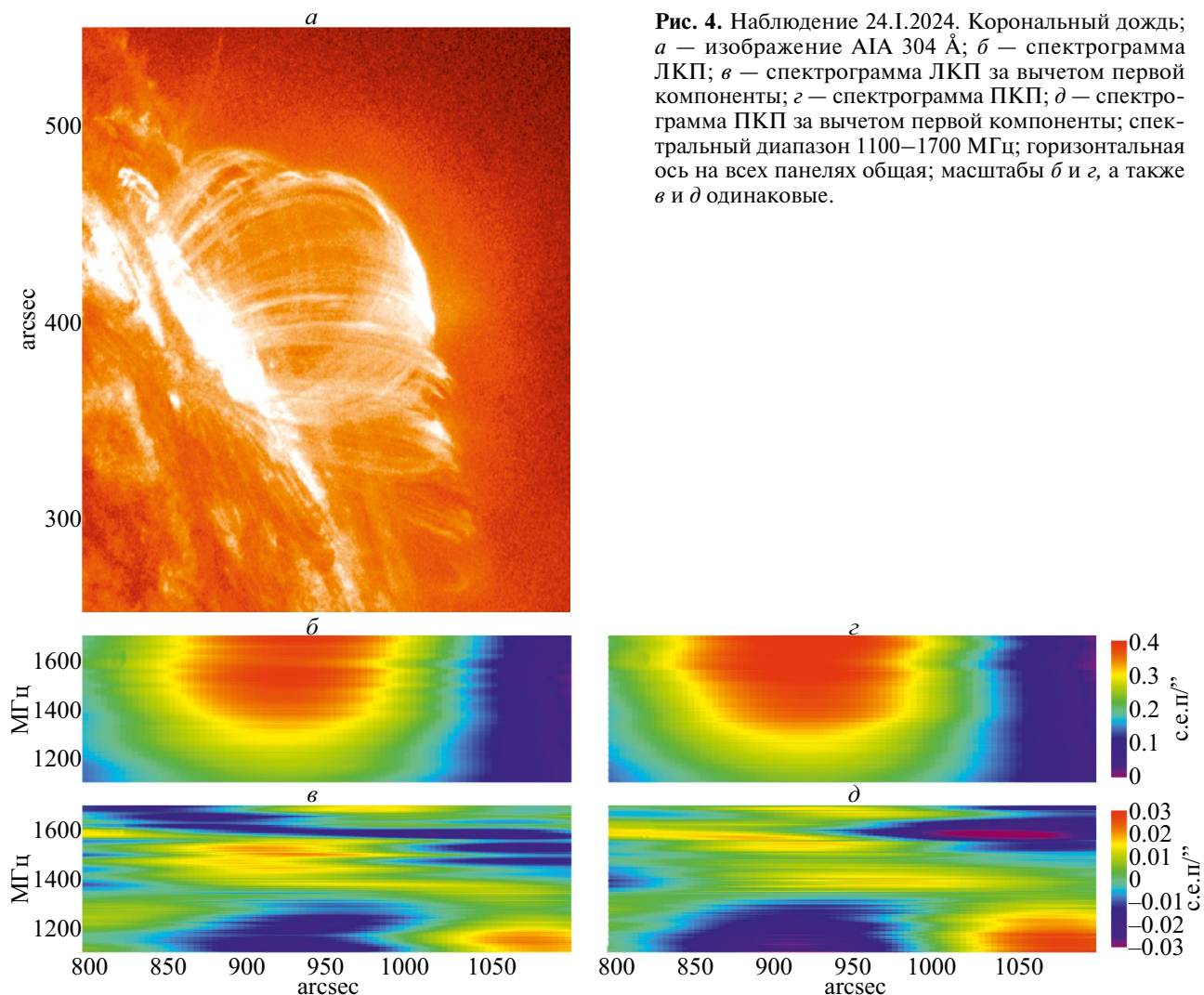


Рис. 4. Наблюдение 24.I.2024. Корональный дождь; *a* — изображение AIA 304 Å; *b* — спектрограмма ЛКП; *в* — спектрограмма ЛКП за вычетом первой компоненты; *г* — спектрограмма ПКП; *д* — спектрограмма ПКП за вычетом первой компоненты; спектральный диапазон 1100–1700 МГц; горизонтальная ось на всех панелях общая; масштабы *b* и *г*, а также *в* и *д* одинаковые.

6.6. Анализ проведенных наблюдений

Результаты проведенных наблюдений показывают, что в детальном спектре дециметрового излучения присутствуют тепловые колебания амплитуды сигнала, чередующиеся между теплыми и холодными частями спектра в областях соответствующих магнитным структурам АО. Новая концепция [16] направлена на поиск тонких структурных изменений в плазменных структурах, возникающих при магнитных пересоединениях, т.е. в радиовсплесках, КПП, микро- и нововсплесках и других событиях.

Можно выделить несколько характерных черт наблюдаемых явлений. В спектрах излучения АО, как правило, наблюдается депрессия, причем в правой и левой круговых поляризациях она проявляется в различной степени. В присутствии холодных плотных конденсаций (волокон, коронального дождя) над АО может наблюдаться узкополосное поглощение в частотной области

1570–1650 МГц. В конденсациях за лимбом в той же области частот наблюдается узкополосное излучение.

Достигнутые параметры чувствительности и частотного разрешения позволяют по-новому взглянуть на структуру короны. Чувствительность, оцененная по измеренным колебаниям яркости наблюдаемых структур, достигает 0.01–0.001 с. е. п. Поскольку эти структуры наблюдаются преимущественно над АО, возможное объяснение их природы состоит в проявлении объектов типа коронального дождя [56].

7. ОБСУЖДЕНИЕ

7.1. Возможная интерпретация депрессии в спектрах излучения АО

Предполагается, что основу короны составляют петли, которые находятся в состоянии термического неравновесия (TNE), характеризующиеся циклами нагрева (испарения) и охлаждения

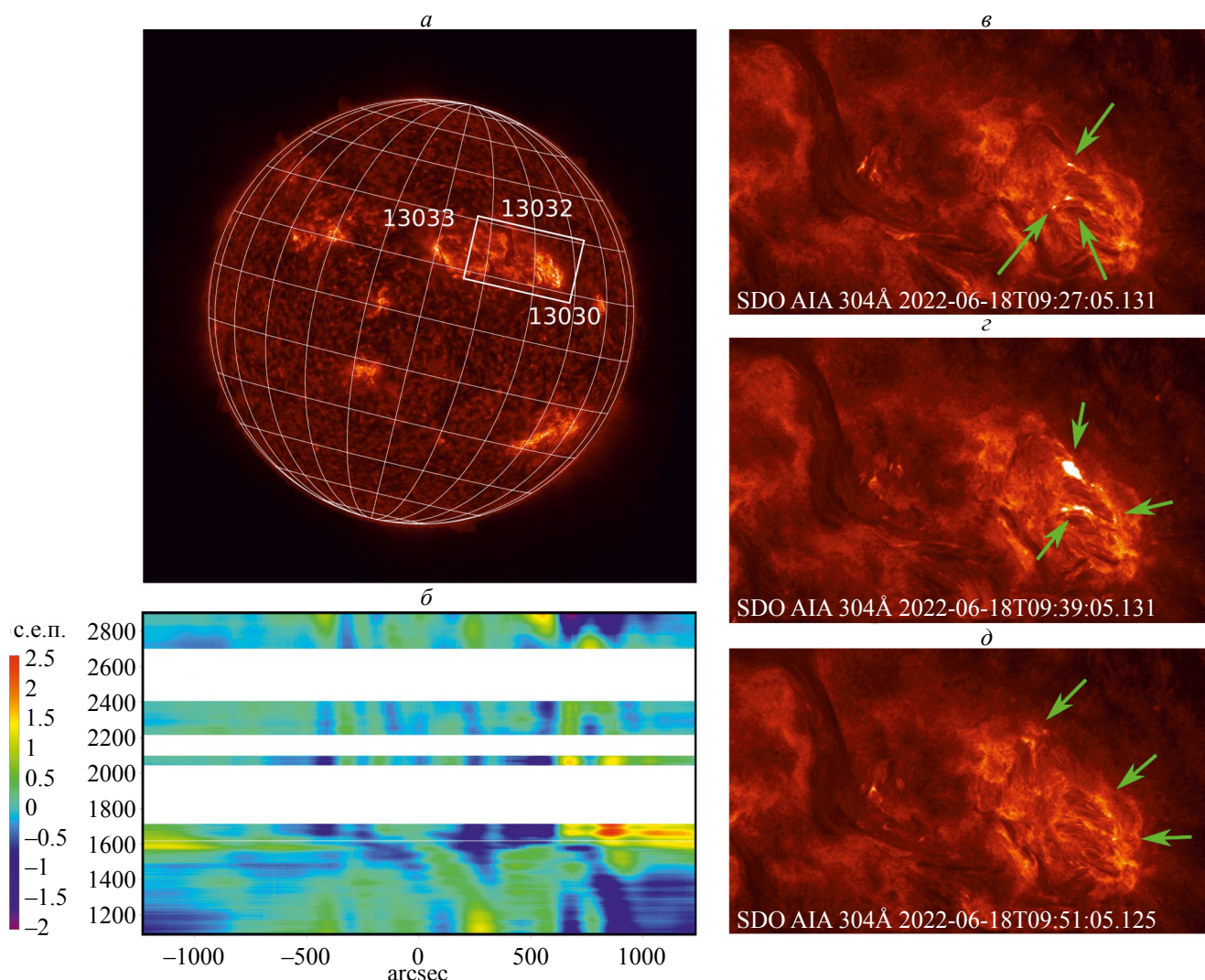


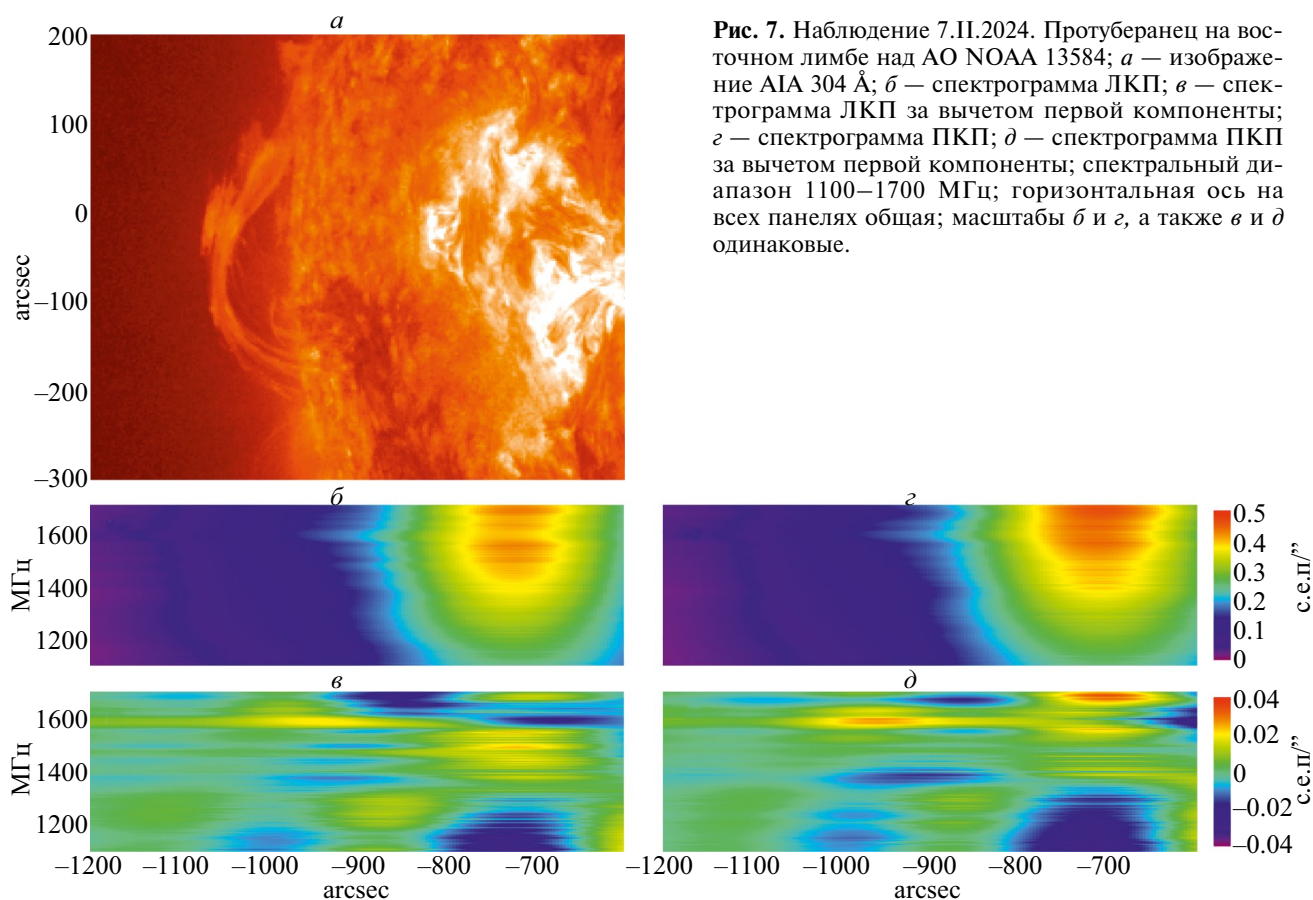
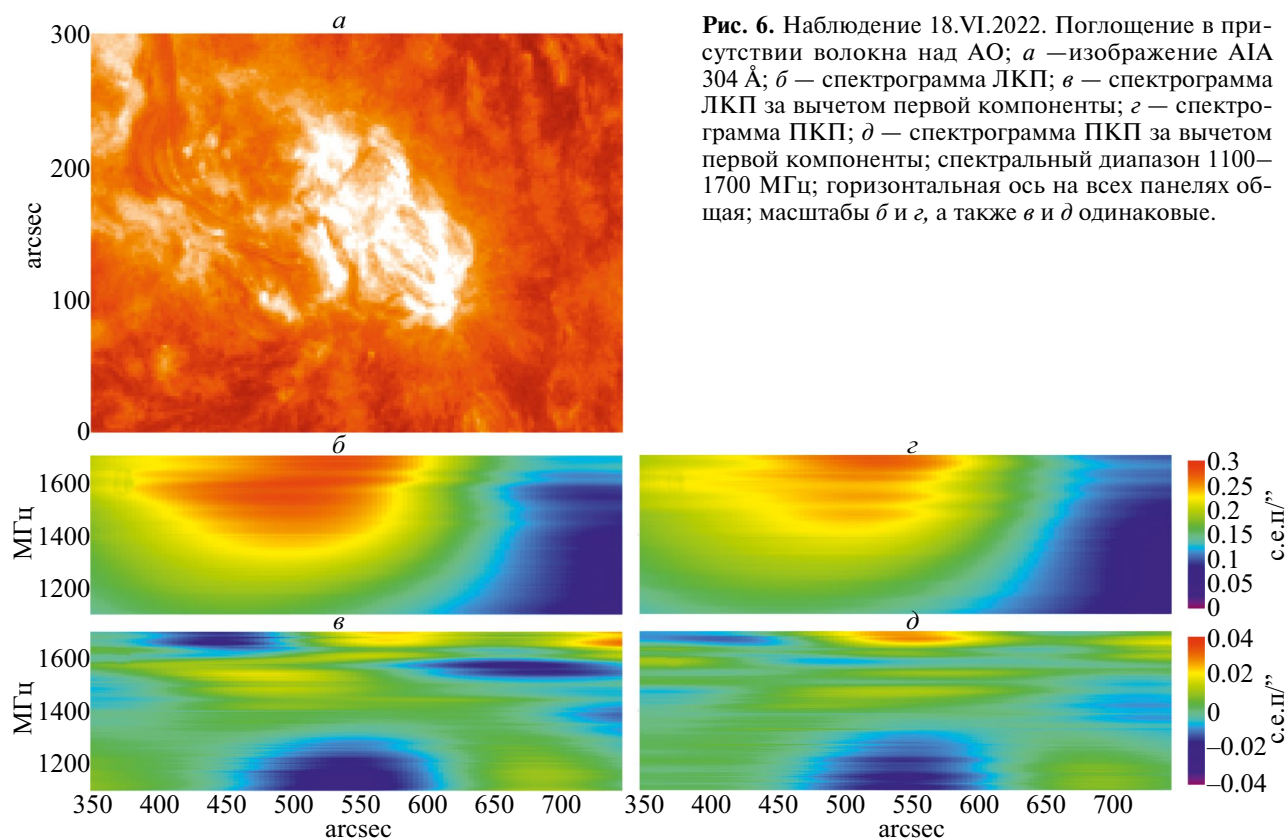
Рис. 5. Наблюдение 18.VI.2022.

(конденсации). В области разогрева возникают ускоренные частицы, которые проходят теплые и холодные слои короны и попадают после конденсации в нижележащие магнитные ловушки, в которых накапливаются и достигают оптически плотного состояния. Это и является проявлением радиопоглощения.

Можно предположить, что вспышки в АО представляют собой длительные процессы, в которых мощные уярчения чередуются с непрерывной генерацией на низком уровне мощности. В результате постоянного умеренного магнитного пересоединения в вершинах петель в относительно стабильной АО образуются ускоренные частицы (в основном электроны), которые разлетаются из нагретой области во все стороны. В этом случае электроны летят по траекториям силовых линий магнитного поля и проходят через

слои плазмы разной температуры. В хвостовой части магнитной структуры АО могут образовываться магнитные ловушки, в которых температура снижена из-за уменьшения теплоотдачи и конденсации горячих электронов. Оптическая плотность среды в этих местах увеличивается со временем, и в конце концов плазма становится оптически толстой.

Другое объяснение может состоять в следующем. Поскольку плазма в короне над АО оптически толстая, любой высоте в атмосфере h соответствует определенная частота f_h , такая, что излучение с частотой $f < f_h$ вследствие поглощения не выходит из слоев, лежащих ниже h . Пусть на некоторой высоте h_0 над АО имеется слой плазмы, плотной по сравнению с окружающей средой, причем плазменная частота f_p , со-



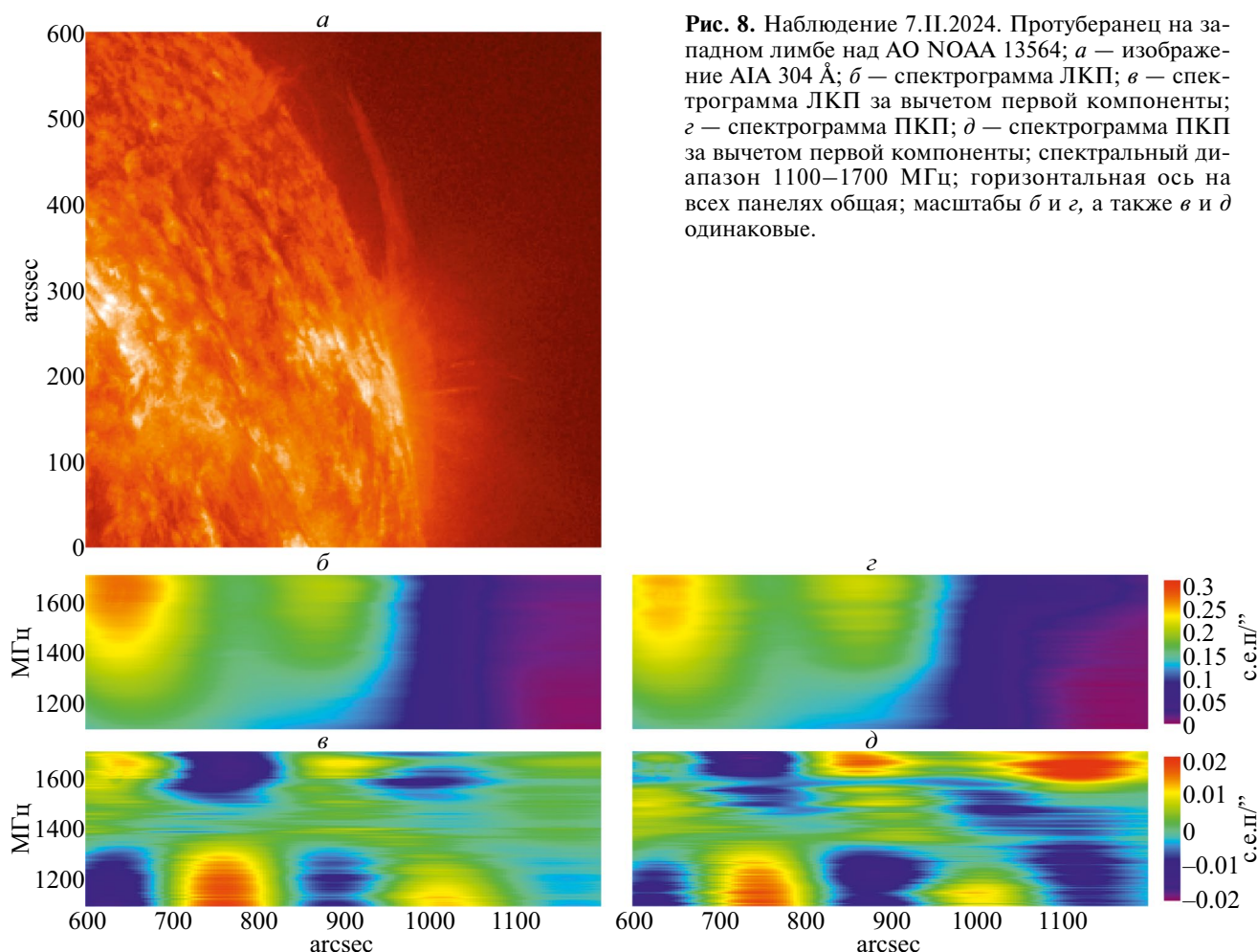


Рис. 8. Наблюдение 7.11.2024. Протуберанец на западном лимбе над АО NOAA 13564; *a* — изображение AIA 304 Å; *b* — спектрограмма ЛКП; *c* — спектрограмма ЛКП за вычетом первой компоненты; *d* — спектрограмма ПКП; *e* — спектрограмма ПКП за вычетом первой компоненты; спектральный диапазон 1100–1700 МГц; горизонтальная ось на всех панелях общая; масштабы *b* и *c*, а также *e* и *d* одинаковые.

ответствующая концентрации электронов в этом слое, ниже, чем соответствующая высоте h_0 частота f_{h_0} . В таком случае через плотный слой пройдет только излучение с частотами выше f_p , т. е. из слоев, лежащих ниже высоты h_p , соответствующей плазменной частоте ($h_p < h_0$), а излучение с частотами $f_{h_0} < f < f_p$ будет этим слоем отражено. Излучение с частотами $f < f_{h_0}$ беспрепятственно уйдет в пространство, поскольку соответствующие слои атмосферы лежат выше плотного слоя. Таким образом, в спектре образуется депрессия на частотах $f_{h_0} < f < f_p$.

7.2. Образование холодных конденсаций

Мелкомасштабные конденсации с близкими температурами и, возможно, плотностями (порядка 10^3 – 10^4 К; 10^{10} – 10^{12} см $^{-3}$) [56] могут образовываться в корональных петлях и проявляться в наблюдениях как явление коронального дождя.

На многих крупных оптических инструментах и космических обсерваториях корональные дожди на лимбах наблюдаются регулярно, например, в H α над лимбом или в УФ-данных *SDO*. Однако в радиодиапазоне это первый случай, когда удастся отождествить спектральные радиоструктуры с корональным дождем.

Физический механизм, ответственный за конденсацию (резкое охлаждение плазмы, сопровождающееся столь же резким увеличением плотности) — это, скорее всего, тепловая неустойчивость, возникающая при нарушении баланса между нагревом и охлаждением корональной плазмы. Этот сценарий требует численного моделирования с учетом измеряемых параметров поглощения на радиоволнах. Становится ясно, что неоднородные разнотемпературные структуры, наблюдаемые на диске Солнца, присутствуют в возмущенной плазме и являются необходимыми для образования коронального дождя [56].

7.3. Возможность поиска рекомбинационных линий в короне

Еще один вопрос, находящийся в разработке, связан с поиском узкополосных спектральных структур в солнечной короне. Еще в 1980 г. В. К. Херсонский и Д. А. Варшалович [57] провели расчеты интенсивности рекомбинационных линий водорода в условиях хромосферы. Ими было показано, что из-за столкновительных процессов в плазме при хромосферных значениях плотности контраст излучения рекомбинационных линий, соответствующих переходам из несвязанного состояния на достаточно высокие энергетические уровни ($\lambda \gtrsim 2.5$ м в случае водорода), мал по отношению к излучению в радио-континууме, что препятствует обнаружению рекомбинационных линий данных условиях. Тот факт, что до сих пор в радиоизлучении рекомбинационные линии надежно не обнаружены [41], говорит в пользу их расчетов.

Тем не менее, предложенная новая методика с высоким частотным разрешением и наличие узких поглощений в протуберанцах (по корональному дождю) говорят о возможности таких поисков.

Дальнейшее применение методов спектральной радиометрии для расширения пределов оценок по нагреву короны требует создания модельных подходов для анализа механизмов с предельно малыми уровнями излучения. Этому будет способствовать и дальнейшее расширение этих методов в более высокочастотный радиодиапазон.

8. ВЫВОДЫ

Работа посвящена первым результатам наблюдений на новом спектральном комплексе высокого разрешения в диапазоне 1–3 ГГц на радиотелескопе РАТАН-600. Высокая чувствительность подтверждена методом измерения слабых сигналов и составляет 0.01–0.001 с. е. п. в широком частотном диапазоне. Было замечено несколько новых эффектов: депрессия в спектрах излучения АО, неравномерное тепловое распределение в детальных температурных спектрах, регистрация на солнечном диске эффекта коронального дождя и др. Предложены предварительные интерпретации, которые нуждаются в дальнейшей разработке.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки

и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mészárosóvá H., Karlický M., Sawant H. S. et al.* Solar decametric type III bursts in semi-closed magnetic field structures // *Astron. Astrophys.* 2008. V. 484. Iss. 2. P. 529–536. DOI:10.1051/0004-6361:20077634.
2. *Isliker H., Benz A.O.* Catalogue of 1-3 GHz solar flare radio emission, GHz solar flare radio emission // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1994. V. 104. P. 145–160.
3. *Gary D. E., Bin Chen, Dennis B. R.* Microwave and hard X-ray observations of the 2017 September 10 solar limb flare // *Astrophys. J.* 2018. V. 863. Iss. 1. DOI:10.3847/1538-4357/aad0ef
4. *Богод В.М.* Радиоастрономический метод исследования солнечной короны // в монографии: Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т. I. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
5. *Алтынцева А. Т., Лесовой С. В., Глоба М. В. и др.* Многоволновый Сибирский радиогелиограф // *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6. № 2. С. 37–50. DOI:10.12737/szf-62202003
6. *Zhang P., Zucca P., Sridhar S. S. et al.* Interferometric imaging with LOFAR remote baselines of the fine structures of a solar type-IIIb radio burst // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 639. Art.ID. A115. DOI:10.1051/0004-6361/202037733
7. The Radioheliograph Group. The Mark IV Nançay radioheliograph. *Sol. Phys.* 1989. V. 120. P. 193–204. DOI:10.1007/BF00148543
8. *Sawant H.S., Fernandes F.C.R., Neri, J.A.C.F. et al.* Southern hemisphere solar radio heliograph Brazilian Decimetric Array (BDA) // *Proc. 10th European Solar Physics Meeting.* Prague, Czech Republic. ESA SP-506. 2002. V. 2.
9. *Yan Y., Zhang J., Chen Z. et al.* Progress on Chinese Spectral Radioheliograph—CSRH construction // *Proc. XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium.* Istanbul, Turkey. IEEE. 2011. DOI:10.1109/URSIGASS.2011.6051218.
10. *Gelfreikh G.B.* Coronal magnetic field measurements through bremsstrahlung emission // *Solar and Space Weather Radiophysics* / ed. D.E. Gary & C.U. Keller. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. DOI:10.1007/1-4020-2814-8_6.

11. *Goddard C.R., Nisticò G., Nakariakov V.M. et al.* Observation of quasi-periodic solar radio bursts associated with propagating fast-mode waves // *Astron. Astrophys.* V. 594. Iss. A96. DOI: 10.1051/0004-6361/201628478.
12. *Brueckner G.E., Bartoe, J.-D.F.* Observations of high-energy jets in the corona above the quiet sun, the heating of the corona, and the acceleration of the solar wind // *Astrophys. J.* 1983. V. 272. P. 329–348. DOI:10.1086/161297.
13. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* Detection of prolonged, extremely faint decimeter bursts on the Sun // *Astronomy Reports* 2001. V. 45. Iss. 8. P. 643–651
14. *Bogod V.M., Mercier C., Yasnov L.V.* About the nature of long-term microflare energy release in the solar active regions // *Journal of Geophysical Research.* 2001. V. 106. Iss. A11. P. 25353–25360. DOI:10.1029/2000JA004013.
15. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* The nature of decimeter-wave microburst emission // *Astronomy Reports.* 2005. V. 49. Iss. 2. P. 144–154. DOI:10.1134/1.1862361.
16. *Богод В.М., Лебедев М.К., Овчинникова Н.Е. и др.* О новой концепции спектральной радиометрии на РАТАН-600 // *Изв. Крымской астрофиз. общ.* 2023. Т. 119. № 4. С. 17–26. DOI:10.34898/izcrao-vol119-iss4-pp17-26.
17. *DeWijn A.G., Casini R., Carlile A. et al.* The visible spectro-polarimeter of the Daniel K. Inouye Solar Telescope // *Solar Phys.* 2022. V. 297. Art.ID. 22. DOI:10.1007/s11207-022-01954-1.
18. *Scharmer G.B., Bjelksjo K., Korhonen T.K. et al.* The 1-meter Swedish solar telescope // in: *SPIE Conf. Series.* 2003. V. 4853. Art.ID. 341. DOI:10.1117/12.460377.
19. *Goode P.R., Wenda Cao.* The 1.6 m off-axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear // *Ground-based and airborne telescopes VI. Proc. the SPIE.* V. 8444. Art. ID. 844403. DOI:10.1117/12.925494.
20. *Ogawara Y., Acton L.W., Bentley R.D. et al.* The status of YOHKOH in orbit — an introduction to the initial scientific results // *Publ. Astron. Soc. of Japan.* 1992. V. 44. P. L41–L44. DOI:10.1016/0021-9169(94)00137-D.
21. *Domingo V., Fleck B., Poland A.I.* The SOHO mission: An overview // *Sol Phys.* 1995. V. 162. P. 1–37. DOI:10.1007/BF00733425.
22. *Kaiser M.L.* The STEREO mission: an overview // *Advances in Space Research.* 2004. V. 36. Iss. 8. P. 1483–1488. DOI:10.1016/j.asr.2004.12.066.
23. *Lites B.W., Akin D.L., Card G et al.* The Hinode spectro-polarimeter // *Solar Phys.* 2013. V. 283. P. 579–599. DOI:10.1007/s11207-012-0206-3.
24. *Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C.* The Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 3–157. DOI:10.1007/s11207-011-9841-3.
25. *Kaltman T.I., Stupishin A.G., Anfinogentov S.A. et al.* Hot jets in the solar corona: creating a catalogue of events based on multi-instrumental observations // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. Iss. 7. P. 1083–1091. DOI:10.1134/S0016793221070070.
26. *Raouafi N.E., Patsourakos S., Pariat E. et al.* Solar coronal jets: observations, theory, and modeling // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 201. P. 1–53. DOI:10.1007/s11214-016-0260-5.
27. *Kolotkov D.Y., Zavershinskii D.I., Nakariakov V.M.* The solar corona as an active medium for magnetoacoustic waves // *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 2021. V. 63. Iss. 12. Art. ID. 124008. DOI:10.1088/1361-6587/ac36a5.
28. *Anfinogentov S., Kaltman T. Stupishin A. et al.* Diagnostics of plasma jets in the solar corona // *Solar-Terrestrial Physics.* 2021. V. 7. Iss. 2. P. 3–10. DOI:10.12737/szf-72202101.
29. *Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Storozhenko A.A. et al.* Quasi-periodic pulsations in a solar microflare // *Astrophys. J.* 2018. V. 859. Iss. 2. Art.ID. 154. DOI:10.3847/1538-4357/aabfb9.
30. *Parker E.N.* Nanoflares and the solar X-Ray corona // *Astrophys. J.* 1988 V. 330. P. 474–479. DOI:10.1086/166485.
31. *Богачёв С.А., Ерхова Н.Ф.* Измерение энергетического распределения нановспышек малой мощности // *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9. № 1. С. 3–9. DOI:10.12737/szf-91202301.
32. *Yasnov L.V., Bogod V.M., Gofman A.A. et al.* Spectrum and physical conditions in microflare generation regions at decimeter-wave frequencies // *Astrophys. Bull.* V. 72. Iss. 1. P. 58–66. DOI:10.1134/S1990341317030075.
33. *Богод В.М., Лебедев М.К., Овчинникова Н.Е. и др.* Спектрорадиометрия солнечной короны на РАТАН-600 // *Косм. исслед.* 2023. Т. 61. № 1. С. 1–7. DOI:10.31857/S0023420623010016.
34. *Рипак А.М., Богод В.М., Гренков С.А. и др.* Помехоустойчивый радиометр дециметрового диапазона для радиотелескопа РАТАН-600 // *Астрофизический бюллетень.* 2023. Т. 78. № 4. С. 657–669.
35. *Lebedev M., Ripak A., Bogod V.* High-speed spectroradiometry using a statistical method of RFI suppression for radio observations with RATAN-600 // *Ground-based astronomy in Russia: 21 century. Proc. All-Russian Conference. Nizhny Arkhyz, Russia.* 2020. DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_413.

36. *Lebedev M.K., Ovchinnikova N.E., Bogod V.M. et al.* Digital methods of RFI mitigation in radio astronomy // Proc. The Multifaceted Universe: Theory and Observations. 2022. Nizhny Arkhyz, Russia. DOI:10.22323/1.425.0006.
37. *Ovchinnikova N.E., Lebedev M.K., Bogod V.M. et al.* Results of a new approach to the analysis of multi-wavelength observations data obtained with RATAN-600 // Proc. The Multifaceted Universe: Theory and Observations. 2022. Nizhny Arkhyz, Russia. DOI:10.22323/1.425.0007.
38. *Bogod V., Lebedev M., Ovchinnikova N. et al.* Detection of absorption in the decimeter radio emission of solar corona // Proc. The Multifaceted Universe: Theory and Observations. 2022. Nizhny Arkhyz, Russia. DOI:10.22323/1.425.0005.
39. *Богод В.М., Корольков Д.В.* Обнаружение хромосферной сетки в сантиметровом диапазоне волн // Письма в АЖ. 1975. Т. 1 № 10. С. 25–27.
40. *Bogod V.M., Garaimov V.I., Zheleznyakov V.V. et al.* Cyclotron lines in the spectra of solar microwave radiation: RATAN-600 observations and their interpretation // Astron. zh. 2000. V. 77. Iss. 1. P. 1–8. DOI:10.1134/S0016793217070167.
41. *Дравских А.Ф., Дравских Ю.А.* Рекомбинационные радиолнии на Солнце // Астрономический журнал. 2022. Т. 99. № 6. С. 496–505. DOI:10.31857/S0004629922060032.
42. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1983.
43. *Gary D.E., Hurford G.J., Nita G.M. et al.* The Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA) // Proc. American Astronomical Society Meeting #224. 2014.
44. *Tokhchukova S.Kh., Korzhavin A.N., Bogod V.M. et al.* Computation of the horizontal size of the RATAN-600 beam pattern for the “Southern Sector with a Flat Reflector” mode with allowance for the parameters of primary feeds // Astrophys. Bull. 2014. V. 69. Iss. 3. P. 356–367. DOI:10.1134/S1990341314030110.
45. *Дребущак Т.Н.* Введение в хеометрику. Новосибирск: НГУ, 2013.
46. *Померанцев А.* Метод главных компонент (PCA). Российское хеометрическое общество, 2008.
47. *Heyer M.H., Schloerb F.P.* Application of principal component analysis to large-scale spectral line imaging studies of the interstellar medium // Astrophys. J. 1997. V. 475. Iss. 1. P. 173–187. DOI:10.1086/303514.
48. *Стороженко А.А., Богод В.М., Лебедев М.К. и др.* Система автоматического управления приемным зеркалом РАТАН-600 для режима слежения // сб. тр. XXV Всероссийская ежегодная конференция “Солнечная и солнечно-земная физика — 2021”. Санкт-Петербург, Россия. 2021. DOI: 10.31725/0552-5829-2021-249-252.
49. *White S.M.* Radio Measurements of Coronal Magnetic Fields // Proc. Int. Conf. on Chromospheric and Coronal Magnetic Fields (ESA SP-596). Katlenburg-Lindau, Germany. ESA Publications Division, 2005.
50. *Gary D.E., Hurford G.J.* Solar Radio Burst Spectral Observations, Particle Acceleration, and Wave-Particle Interactions // Geophysical Monograph Series. Washington D.C.: American Geophysical Union, 2013. P. 237–246. DOI:10.1029/GM054p0237.
51. *Alissandrakis C.E., Kundu M.R.* Observations of ring structure in a sunspot associated source at 6 centimeter wavelength // Astrophysical J. 1982. V. 253. Art.ID. L49. DOI:10.1086/183734.
52. *White S.M., Kundu M.R., Gopalswamy N.* Strong magnetic fields and inhomogeneity in the solar corona // Astrophysical J. 1991. V. 366. Art.ID. L43. DOI:10.1086/185905.
53. *Zlotnik E.Ya., Kundu M.R., White S.M.* A model of the atmosphere above a sunspot from radio observations // Radiophys Quantum Electron. 1996. V. 39. Iss. 3. P. 255–267. DOI:10.1007/BF02144449.
54. *Bezrukov D., Ryabov B., Peterova N. et al.* Sharp Changes in the Ordinary Mode Microwave Emission from a Stable Sunspot: Model Analysis // Latvian J. Physics and Technical Sciences. 2011. V. 48. Iss. 2. P. 56–69. DOI:10.2478/v10047-011-0016-7.
55. *Vrublevskis A., Ryabov B.I., White S.M.* Reduced Microwave Brightness Temperature in a Sunspot Atmosphere Due to Open Magnetic Fields // Sol. Phys. 2021. V. 296. Iss. 10. Art.ID. 144. DOI:10.1007/s11207-021-01891-5.
56. *Antolin P.* Thermal instability and non-equilibrium in solar coronal loops: from coronal rain to long-period intensity pulsations // Plasma phys. control. fusion. 2020. V. 62. Art. ID. 014016. DOI:10.1088/1361-6587/ab5406.
57. *Khersonskii V.K., Varshalovich D.A.* The possibility of observing recombination lines in solar radiation // Soviet Astronomy. 1980. V. 24. P. 359–360.