



Астрономия

Исследования атмосферы Солнца

В.М. БОГОД,
доктор физико-математических наук
САО РАН

В настоящее время радиотелескоп РАТАН-600 активно используется, он обладает высоким пространственным разрешением и высокой чувствительностью по яркостной температуре, низким уровнем инструментальной поляризации, большим динамическим диапазоном и многооктавным (многочастот-



ным) перекрытием диапазона рабочих частот.

В статье делается попытка обобщить результаты исследования радиоизлучения Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 за период с 2006 по 2016 гг. для демонстрации значимости этого направления на мировом уровне.

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЦА В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Солнечная атмосфера сейчас активно исследуется космическими обсерваториями "SOHO", "TRACE", "RHESSI", "CORONAS", "GOES", "SDO", "STEREO-A и -B" (Земля и Вселенная, 2003, № 3; 2007, № 2; 2010, № 6; 2013, №№ 3 и 5). Они работают в диапазонах волн, которые не пропускает земная атмосфера – главным обра-

зом в линиях ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. Однако измерения корональных магнитных полей в этих диапазонах очень сложные и часто невозможны из-за высоких температур в короне Солнца, достигающей миллионов градусов. Наблюдения в микроволновом диапазоне значительно дополняют эти исследования, обеспечивая прямую, недублируемую информацию о параметрах плаз-

мы в верхней хромосфере нижней короны и в переходном слое между ними. В области физических исследований атмосферы Солнца (его радиоизлучения) на РАТАН-600 получены результаты, многие из которых до сих пор не доступны другим радиоастрономическим инструментам. Это в значительной мере относится к высокоточным измерениям круговой поляризации излучения пространственных струк-



Перископическое зеркало на Южном секторе радиотелескопа РАТАН-600, состоящее из 124 отражательных элементов высотой 8,5 м и шириной 3,1 м каждое. Перископ протяженностью 400 м управляется по углу высоты и обзревает южную часть неба в диапазоне азимутальных углов – от + 30° до –30°.

тур различных размеров и контрастов в широком интервале частот. Например, на первых же слабоконтрастных изображениях РАТАН-600 была обнаружена грануляционная структура на диске Солнца в сантиметровом диапазоне радиоволн, которая в дальнейшем была подтверждена и в наблюдениях на других радиотелескопах.

Спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600 позволили разработать методы диагностики и измерения корональных магнитных полей. Несмотря на пионерский характер этих работ, их уровень до настоящего времени не достигнут на других инструментах. Это происходит потому, что специализированные инструменты (радиогелиографы) основаны на интерферометрических принципах, в связи с чем выполняемые на

них наблюдения не были спектральными и не имели необходимую чувствительность по поверхностной яркости.

Строящиеся новые радиогелиографы “CSRP” (Китай) и “ССРТ” (Россия) должны быть спектральными инструментами, они смогут решать многие задачи по спектрам вспышечных событий.

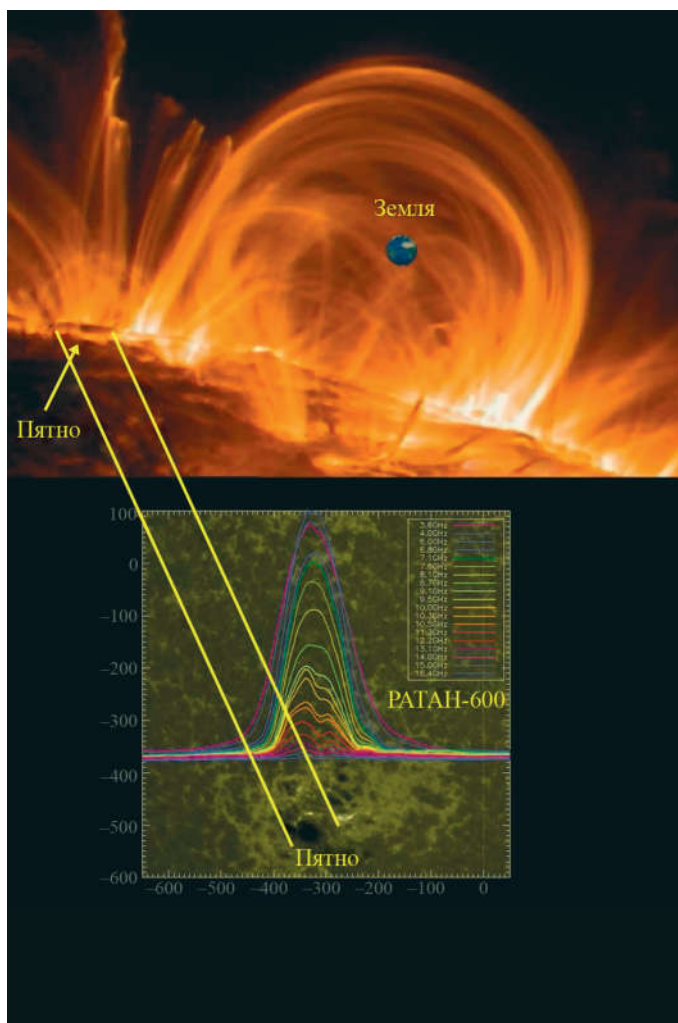
Следующим фактором, который выделяет РАТАН-600 из других инструментов в мире, используемых для солнечных исследований, является перекрытие широкого диапазона частот (0,75–18,2 ГГц) непрерывно, с частотным разрешением 1% на 112 отдельных частотных каналах. При этом на каждой частоте отдельно регистрируются правая и левая круговые поляризации радиоизлучения от отдельного радиоисточника на диске Солнца.

Сочетание высокой чувствительности, высокого частотного разрешения и точных измерений поляризации делает эти измерения уникальными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

29 марта 2006 г. произошло полное затмение Солнца, которое наблюдалось на площадке крупного радиотелескопа РАТАН-600 с помощью широкодиапазонного приемного комплекса. Обычно такое явление наблюдают с помощью небольших радиотелескопов и относительно простых радиополяриметров, доставляемых в разные пункты Земли; при этом используется высокое пространственное разрешение благодаря дифракции радиоизлучения на лимбе лунного диска. В результате наблюдений этого затме-

Активная область на диске Солнца (диск Земли наложен для сравнения размеров). Вверху – участок солнечной атмосферы в рентгеновских лучах по данным космической солнечной обсерватории “TRACE”. Фото NASA. Внизу – изображение активной области в линии 1600 \AA , возникшей 21 октября 2014 г., по данным космической солнечной обсерватории “SDO”. На него нанесены сканы, полученные на РАТАН-600 на частотах 3,6–16,4 ГГц. САО РАН.



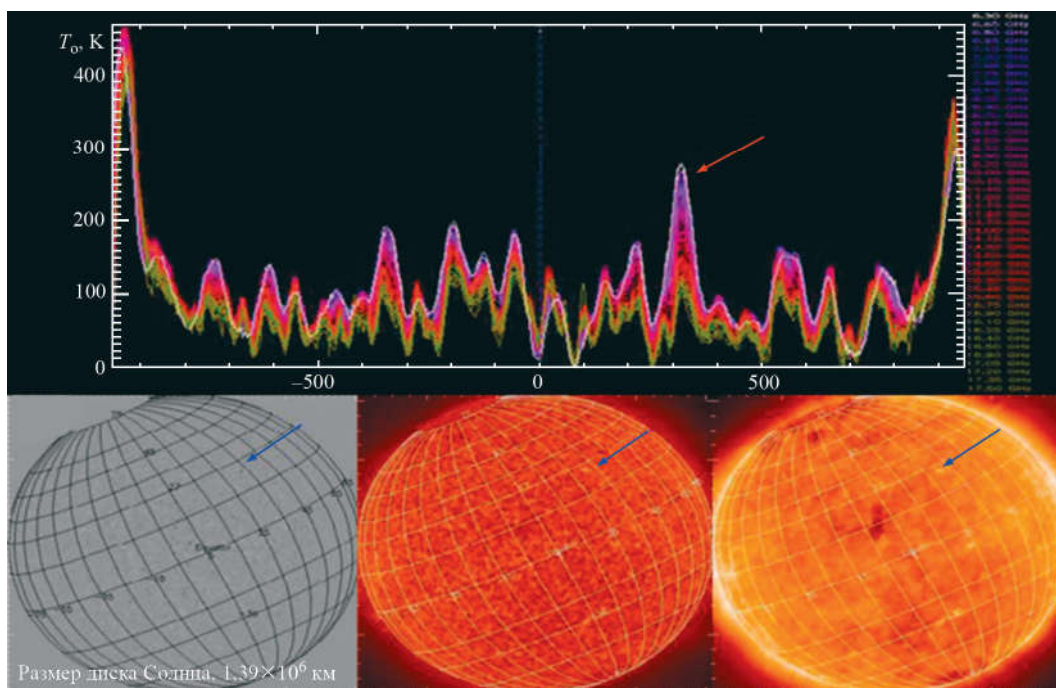
ния была реализована большая эффективная площадь крупного радиотелескопа и его мощные аппаратные возможности по анализу интенсивности и поляризации радиоизлучения.

Обстоятельства затмения были уникальны. Максимальная фаза покрытия Луной солнечного диска составила 0,997. Луна, покрывая весь диск Солнца, касалась его северной зоны и оставляла полоску в 1–3". Это значительно ослабило влияние фонового излучения Солнца и четко локализовало место наблюдений. Использование нового спектрально-поляризационного комплекса в диапазоне 6,0–16,4 ГГц со спектральным разрешением 1% на 56-ти частотных каналах с высокой точностью измерения круговой поляризации (около 0,1%) позволили

получить новые данные о структуре короны над Северным полюсом Солнца в течение 2,5 ч в режиме сопровождения со сменой азимутов наблюдений.

Проведенные авторами на РАТАН-600 спектральные наблюдения полярной зоны Солнца с предельной высотой в ходе максимальной фазы солнечного затмения, в частности, по-

зволили обнаружить существование яркого излучения в микроволновом диапазоне точно над Северным полюсом Солнца. Это излучение состоит из крупного полярного источника фонового излучения с размером около $700''$ (около 12 угловых минут) с интенсивностью около 1–1,5% от уровня “спокойного” Солнца и тонкой пространственной структуры с характерными разме-



рами деталей 40–70" и флуктуациями интенсивности на уровне 0,06%. Это явление интерпретировано как проявление тонкой структуры общего магнитного поля Солнца в виде ярких факельных площадок, из которых плазма истекает в корону на полюсе Солнца. Вблизи полюса Солнца они регистрируются как совокупность множества мелкомасштабных радиоисточников.

КОРОНАЛЬНАЯ МАГНИТОГРАФИЯ

Магнитные поля – доминирующий источник энергии для нагрева солнечной короны и генерации солнечной активности – такой, как вспышки, корональные выбросы

массы и солнечный ветер. Солнечные магнитные поля формируют различные структуры корональной плазмы и участвуют в создании структуры гелиосферы, которая включает в себя Землю и другие планеты. Сегодня проблемы корональной магнитометрии рассматриваются как актуальные для решения многих вопросов солнечной активности. Прямые измерения и диагностика корональных магнитных полей находятся в зачаточном состоянии и остаются технически сложной задачей. Ожидается, что практическое использование результатов современных технологий и быстрый рост в диагностике корональных магнитных полей могут быть

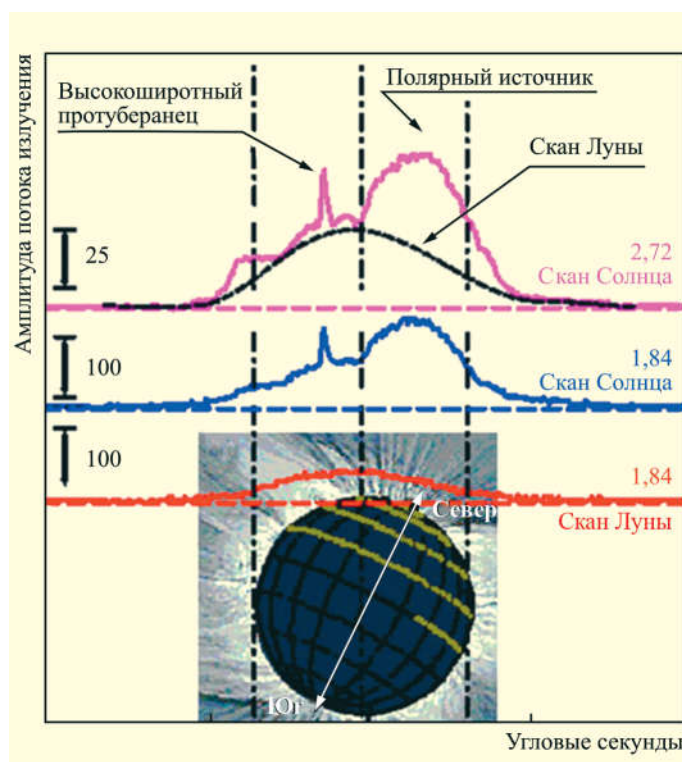
Многоволновые сканы спокойного Солнца с мелкомасштабной структурой, полученные 7 октября 2009 г. на РАТАН-600 (вверху). По горизонтали отложен размер диска Солнца. Справа приведен перечень частот, использованных в наблюдении. Внизу – Солнце в линиях крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$) и Fe IX ($\lambda = 171 \text{ \AA}$). Стрелкой показано отождествление яркого источника на радиосканах и изображениях. Снимки получены 7 октября 2009 г. космической обсерваторией "SOHO". Фото NASA.

достигнуты лишь в следующем десятилетии. Между тем практические наблюдения на РАТАН-600 уже сейчас позволяют делать регулярные оценки корональных магнитных полей

Сканы Северной части диска Солнца во время затмения в Египте 29 марта 2006 г. в 15 ч 16 мин по Гринвичу на волнах 1,84 см и 2,72 см. Вверху показан "вклад" излучения Луны в регистрируемое излучение (2,72 см). Внизу – изображение короны во время полного затмения в 10 ч 40 мин по Гринвичу. Ось абсцисс представлена в угловых секундах от центра диска Солнца. Институт астрофизики, Париж.

в атмосфере Солнца над его пятнами (<http://www.sao.ru/hq/sun/>). В других странах эти измерения еще не освоены, и оценки достигаются путем моделирования будущих измерений.

Учитывая высокую чувствительность радиоастрономического метода даже к небольшим вариациям параметров плазмы (температуре, плотности и магнитному полю), в ИПФАН, ГАО РАН и в САО РАН разработаны разнообразные методики измерения корональных магнитных полей на основе детального спектрального и поляризационного анализа в широком диапазоне волн. Измерения корональных магнитных полей в радиодиапазоне с помощью РАТАН-600 указывают на то, что общепринятые расчеты реконструкции фотосферных магнитных полей с помощью различных моделей часто не корректны: на корональ-

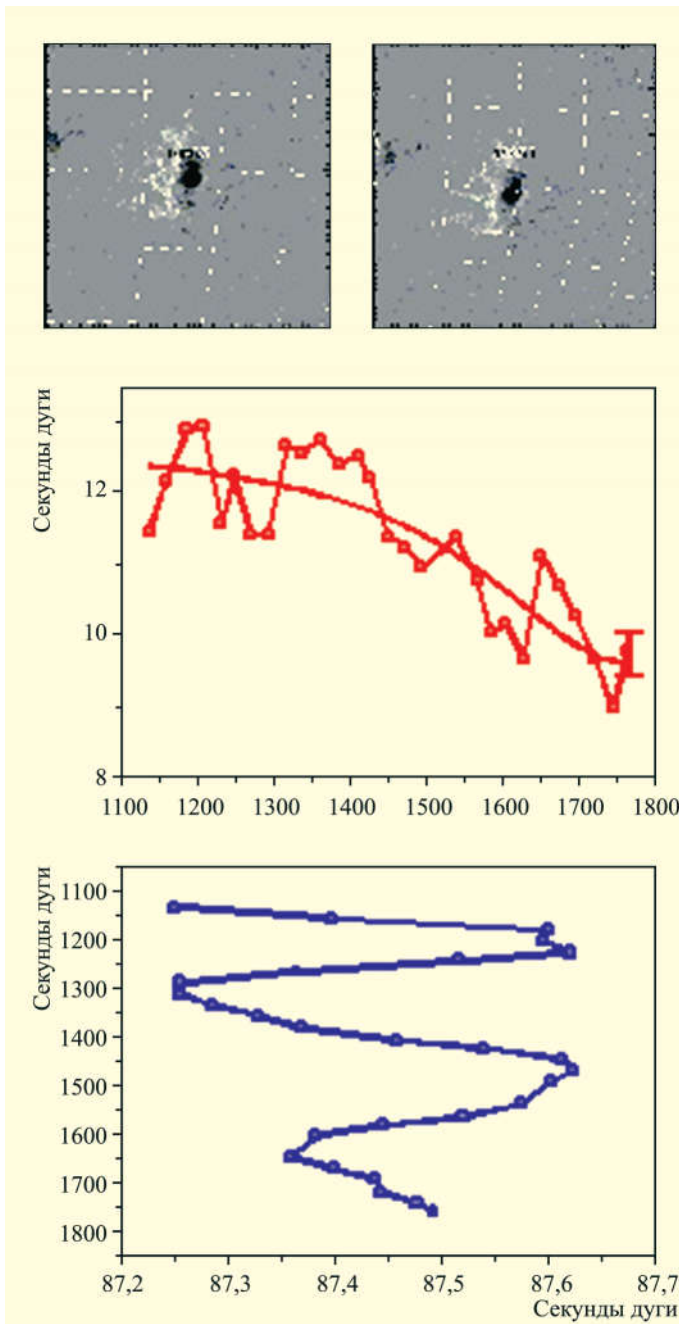


ных высотах – особенно если исследуются активные области, в которых происходят мощные вспышки. В связи с этим существует проблема корректного построения вертикальной структуры магнитного поля в активных областях в широком интервале высот.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Несмотря на быстрое и эффективное развитие спутниковых наблюдений, методы радиоастрономии являются единственными для прямых измерений корональных магнитных полей по поляризованному радио-

излучению. Эти исследования заложены (начиная с 1960 г.) основателями отдела радиоастрономии в Пулковской обсерватории Д.В. Корольковым, Н.С. Соболевой и Г.Б. Гельфрейхом. В дальнейшем на Большом Пулковском радиотелескопе диаметром 100 м была обнаружена и стала подробно исследоваться поляризация радиоисточников на Солнце. На РАТАН-600 большое количество работ по всем структурным объектам проведено уже при более высоком пространственном разрешении. Стало ясно, что повышение точности поляризационных измере-



Стабильная структура магнитного поля пятна на фотосфере Солнца для активной области NOAA 0953. Магнитограммы получены 2–3 мая 2007 г. на космической обсерватории “SOHO”. На графиках представлены радиоизмерения высот для каждой длины волны, соответствующие значениям магнитного поля (средний), а также высотно-долготная структура коронального магнитного поля над пятном, которая имеет вид расходящейся спирали (нижний).

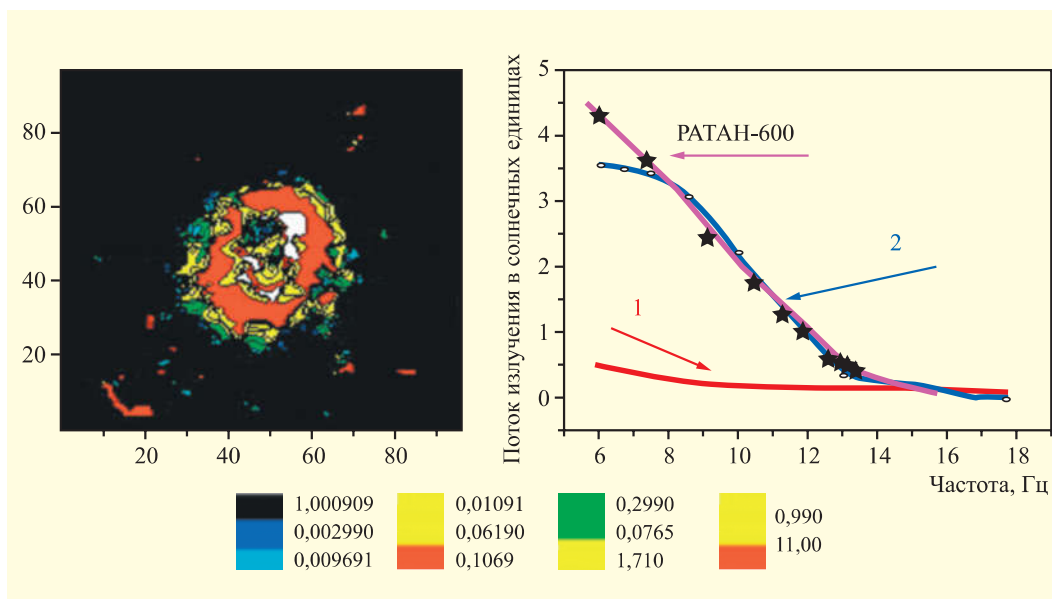
основные характеристики радиотелескопа – в частности, появилась возможность производить подробный спектральный анализ поляризованного излучения при высокой координатной точности радиотелескопа; это позволило развивать стереоскопические методы измерений. В разработках методов измерения корональных магнитных полей с помощью РАТАН-600 применялись различные механизмы тепловой плазмы:

- тепловое тормозное излучение плазмы;
- циклотронное излучение плазмы;
- инверсия круговой поляризации;
- эмиссионная томография на основе спектрально-поляризационных измерений солнечного радиоизлучения.

За прошедший 10-летний период в САО РАН разработаны несколько новых методов измерения высотной структуры корональных магнитных

ний, многоволновый анализ спектра и высокая координатная точность являются основой для измерений корональных магнитных полей.

В последнее десятилетие особая роль отводится и методам моделирования корональных магнитных полей. Значительно улучшились



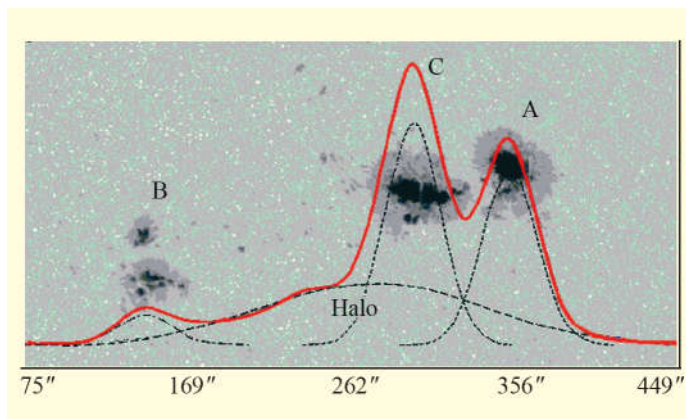
Карта коронального магнитного поля на волне 5 см для АО 10933, полученная в результате реконструкции фотосферных данных с магнитографа японской космической обсерватории "Hipode". Справа – сопоставление расчетных спектров потоков тормозного (1) и циклотронного излучений (2) с данными спектральных наблюдений на РАТАН-600.

полей. В их числе метод динамической многоволновой стереоскопии по спектрально-поляризационным измерениям на РАТАН-600, созданный В.М. Богодом и Л.В. Ясновым (2009). Метод позволяет выстраивать вертикальную структуру коронального магнитного поля в активных областях Солнца. Он основан на измерении координаты источника поляризованного излучения активной

области на определенной частоте при его перемещении по диску Солнца и сопоставлении точных измерений координат на уровне фотосферы (оптические данные) и в нижней короне (с точностью до 1"). Спектрально-поляризационные измерения в широком диапазоне частот дают профиль вертикального распределения поляризованного радиоисточника, который потом пересчитывается в высотный профиль напряженности магнитного поля в случае циклотронного механизма излучения. Учитывая различные отклонения (вращение пятен, широтные изменения угловой скорости вращения Солнца) становится возможным определить наклон силовой трубки магнитного поля.

Обнаружено, что корональные магнитные поля

напряженностью около 600 Гс находятся на довольно больших высотах в атмосфере Солнца – до 40–50 тыс. км, что хорошо согласуется с наблюдениями в ультрафиолете и рентгене. При этом определена расходимость силовых трубок магнитного поля в пределах 20–30% в вершинах магнитных петель. Интересным результатом таких исследований стало обнаружение спиральной высотной структуры коронального магнитного поля над стабильным пятном в активной области. Как показали статистические измерения, такие структуры встречаются часто; их существование объясняет природу большой протяженности "тонких арок", в которых осуществляется перенос энергии с помощью



Активная область NOAA 11309 на Солнце. Радиоизображение получено 30 сентября 2011 г. на РАТАН-600 на волне 3,7 см. Оно наложено на фотогелиограмму с результатами гаусс-анализа. Выделяются радиоисточники над пятнами А, В, С и широкий радиоисточник Halo, покрывающий своими размерами всю активную область.

магнитогидродинамических волн.

Он основан на использовании данных оптических магнитографов, которые реконструируются в модели влияния нелинейного бессилового магнитного поля на корональные уровни. Реконструированные карты магнитных полей проходят стадию модельных расчетов циклотронного излучения и математическую операцию свертки с диаграммой направленности радиотелескопа РАТАН-600 для каждой из 86 длин волн. Анализ пространственной структуры радиоизлучения, выполненный на основе реконструированного магнитного поля, сравнивается с многоволновыми сканами наблюдений в широком микроволновом диапазоне волн на РАТАН-600. Это позволяет локализовать места в активной области повышенной электронной плотности и дополнительного нагрева ко-

рональной плазмы. Удовлетворительное согласие между модельными расчетами корональных магнитных полей и наблюдательными данными удается достичь для активных областей с различной магнитной структурой.

МАГНИТОСФЕРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В результате проведения совместных наблюдений Солнца на интерферометре VLA (США) и РАТАН-600 были получены результаты, которые позволили сформулировать новый подход к комплексу процессов в активной области под названием магнитосфера активной области (К. Ленг, 1993) и Г. Гельфрейх, 1996).

Понятие магнитосфер Земли и активной области созвучны и многие процессы в них имеют подобную природу. Несмотря на то что размеры Земли и активной области на Солнце зна-

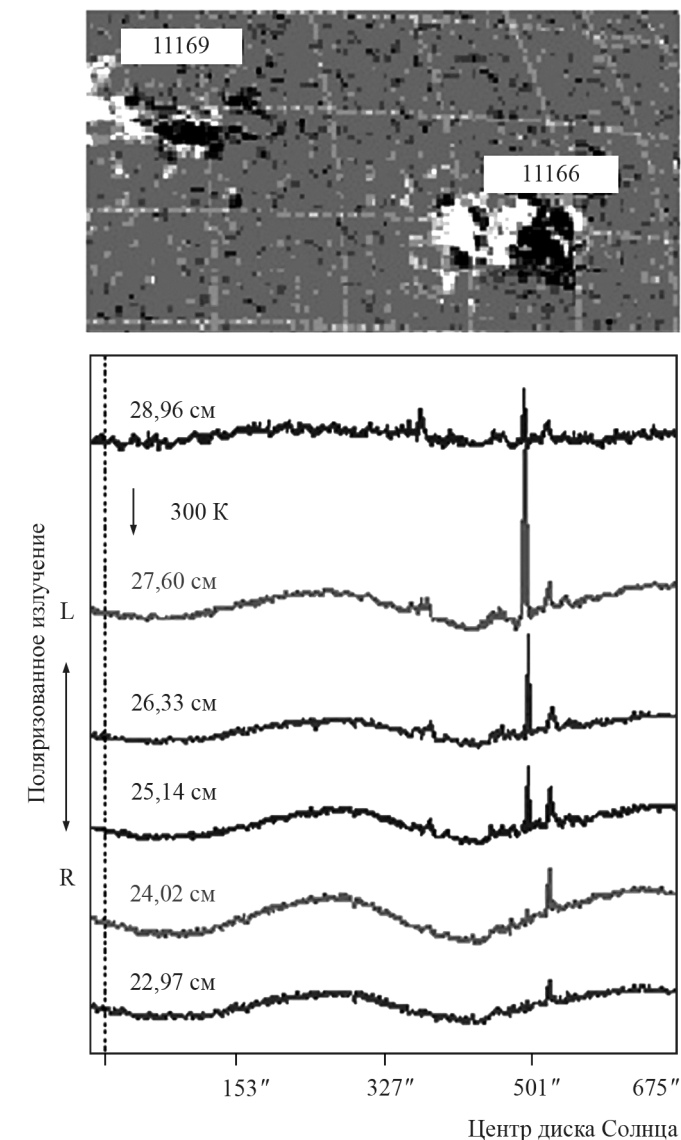
чительно различаются, тем не менее в активных областях обнаружены такие явления, как долгоживущие микровсплески и нетепловое “дециметровое гало”, свойства которых подобны радиационным поясам в магнитосфере Земли. Природа “дециметрового гало” еще не ясна, и его излучение интерпретируется как нетепловое радиоизлучение ускоренных частиц, которые захвачены радиационными поясами магнитосферы активных областей Солнца. Интенсивность этих радиоисточников весьма мала и их излучение обнаруживается только на крупных инструментах рефлекторного типа.

Установлена непосредственная связь между обнаруженным на РАТАН-600 “дециметровым гало” и нетепловым излучением длительно существующих источников – шумовых бурь (многочисленные всплески в метровом диапазо-

Микровсплески на части диска Солнца. Изображение получено 11 марта 2011 г. на радиотелескопе РАТАН-600 в дециметровом диапазоне волн 1,306–1,036 ГГц. Диаграмма последовательно сканирует весь диск (внизу). Место генерации микровсплесков центрируется на линию раздела полярностей магнитного поля NOAA 11166; в NOAA 11169 микровсплесков не обнаружено.

не) в солнечной короне (по аналогии с магнитными бурями в земной магнитосфере). В совместных наблюдениях на сантиметровых волнах на РАТАН-600 (как и на VLA) была обнаружена узкополосная двойная инверсия поляризации в активных областях с шумовыми бурями. Это явление связано с локализацией токовых слоев в верхней короне Солнца – источниками ускорения частиц и месте накопления энергии для шумовых бурь.

Долгоживущие микровсплески, обнаруженные в дециметровом диапазоне, связаны с шумовыми бурями в их метровом диапазоне. Поток микровсплесков находится в диапазоне 0,001–0,1 с.е.п. (солнечная единица потока излучения, равная 10^{-22} Вт/м² Гц) со степенью поляризации (от 10% до 100%) и продолжительностью одиночных импульсов (около 1–2 с). Микровсплески могут существовать в одной



и той же активной области в течение нескольких дней. Детальное сопоставление их с шумовыми бурями в метровом диапазоне длин волн показало, что микровсплески – это проявление излучения шумовых бурь в дециметровом диапазоне длин волн. Для определения напряженности магнит-

ного поля в местах генерации микровсплесков была использована модель двойного плазменного резонанса, а также была определена высокочастотная граница их спектра с помощью многоволнового спектрографа на РАТАН-600. Это позволило (вместе с реконструкцией корональ-

ных магнитных полей по фотосферному полю) определить их высотную структуру и электронную плотность в активных областях над нейтральной линией фотосферного магнитного поля.

Итак, в результате объединения методов измерения корональных магнитных полей с техническими параметрами радиотелескопа РАТАН-600 становится возможным детальное развитие концепции магнитосферы активной области. В нее входят практически все известные структуры, присутствующие в активной области, — от грануляции в радиодиапазоне до шумовых бурь, излучение которых проявляется на радиоволнах. Концепция магнитосферы, рассматривающая проявление радиоизлучения активной области как единый активный комплекс, позволяет пролить свет на соотношение стабильных и активных процессов и их взаимосвязи. Особенно важно определить основные пути переноса нетепловой энергии в тепловую энергию. Доминирующую роль во всех процессах играет магнитное поле, измерение которого на корональных уровнях доступно с помощью радиоастрономического метода. Интересной представляется промежуточная фаза, в которой активные области переходят из стабильной фазы во вспышечную фазу и обратно. Именно

в предвспышечной фазе происходят процессы накопления энергии, процессы формирования токовых слоев, пекулярных источников, возникающих над нейтральной линией магнитного поля. К ней относятся и послевспышечная (послевспышечная) фаза, в которой нетепловое излучение стабилизируется и переходит в тепловую фазу. В ней при наличии источников возмущений (выход нового магнитного потока, нестабильные магнитные конфигурации и др. возмущения) может создаться повторная вспышечная ситуация. Многочисленные поиски критериев прогноза вспышек на Солнце связаны именно с поиском источников первоначальных возмущений и первичного разогрева.

Впервые на основе спектров яркостной температуры излучения радиоисточников над пятнами, выполненные с высоким спектральным разрешением порядка 1% (что соответствует разрешению по высоте в атмосфере Солнца порядка 60 км), была исследована тонкая структура переходной области между хромосферой и короной.

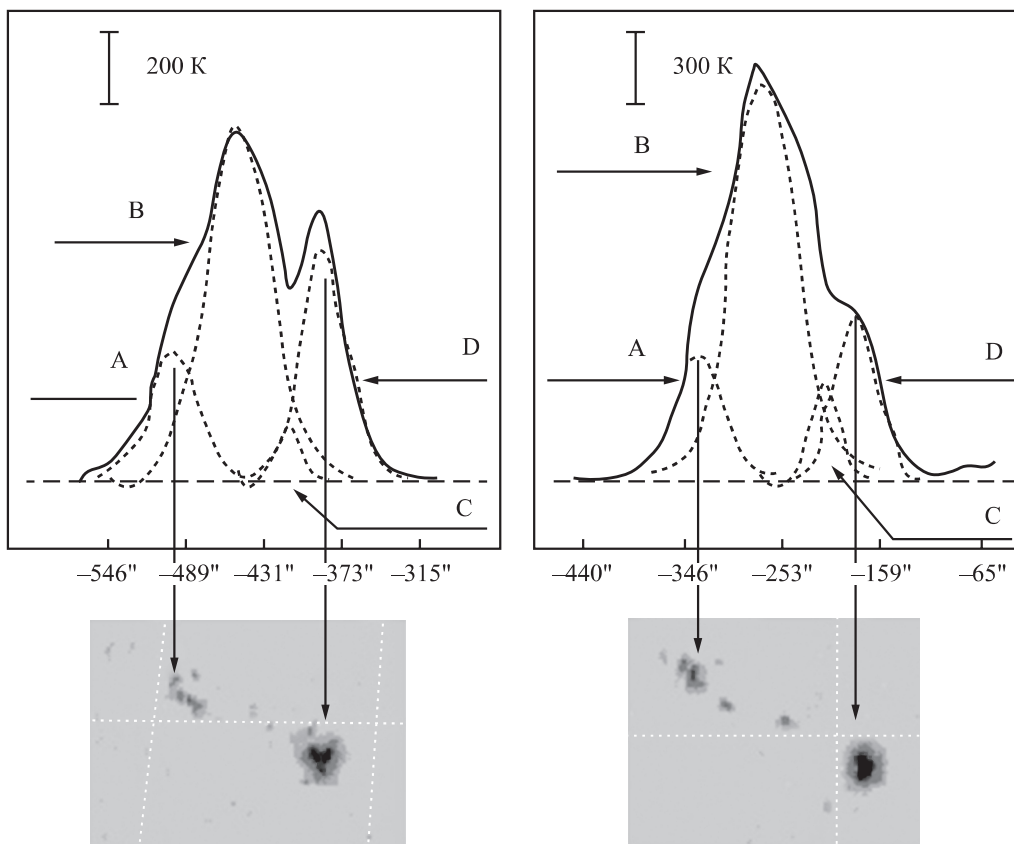
Привязка по высоте сделана с использованием моделей коронального магнитного поля, которые согласованы с наблюдениями фотосферных магнитных полей. Оказалось, что распределение температуры в переходной

области носит плавный характер в диапазоне высот от 2 до 5 тыс. км, что значительно отличается от известных моделей переходной области с резким ростом температуры. Благодаря высокой частоте следования точек в спектре удалось выявить и оценить ошибки в измерениях плотности потока, которые в большей части диапазона (2,5–5 см) не превышают 10–20%. Полученные данные существенно корректируют модель атмосферы над пятном.

ПРИРОДА ПЕКУЛЯРНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Этот тип радиоисточников располагается в короне в пространстве между пятнами над нейтральной линией фотосферного магнитного поля в активной области (АО). Здесь видно, что источник максимальной яркости находился между пятнами, тогда как над пятнами радиоисточники слабее. Такие объекты являются кандидатами в источники первичного разогрева плазмы во вспышечных АО. По многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 построены спектры потоков и степени поляризации таких источников в диапазоне 4–17 ГГц.

Результаты моделирования пекулярных радиоисточников указывают на то, что их интенсивное излучение и слабая



Скан на волне 3,0 см активной области NOAA 11358, которая образовалась 27 ноября (слева) и 28 ноября 2011 г. Слева направо вписаны циклотронные источники A и D над пятнами. Самый яркий источник B находится в пространстве между пятнами. Источник C связан с "всплытием" нового магнитного потока. Внизу приведено сопоставление со структурой фотосферного магнитного поля по данным космической обсерватории "SDO" в линии 4500 Å.

ном поле. Интерпретация радиоизлучения радиоисточников над линией раздела магнитных полярностей учитывает особенность их расположения в верхней части корональной арки (или аркады) и особенностей структуры коронального магнитного поля в пространстве между пятнами на Солнце.

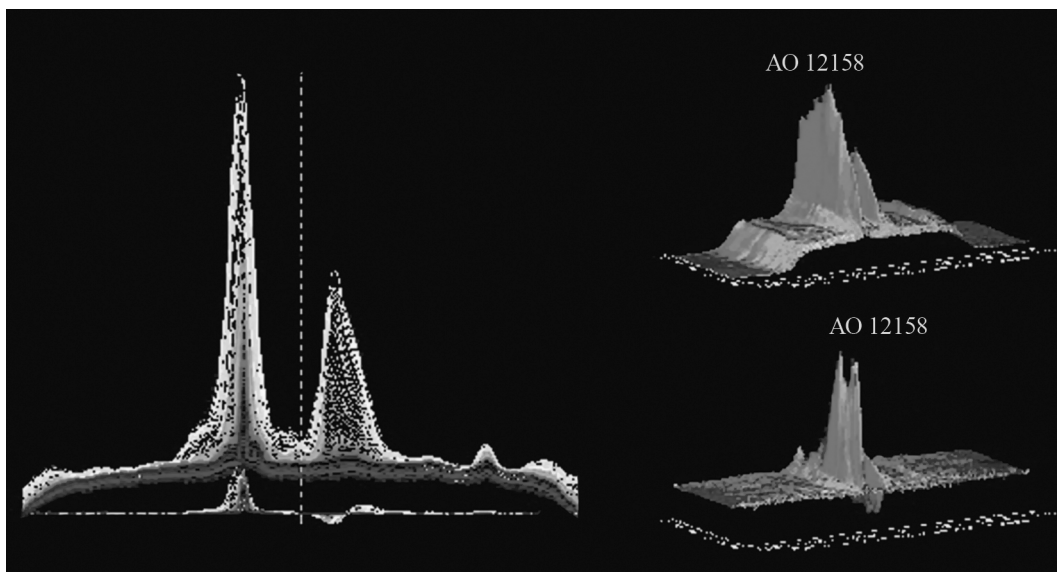
МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Возможности РАТАН-600 в детальном исследовании спектров поляризованного радиоизлучения активных областей на

Солнце привели к значительному углублению знаний о природе их активности на высотах переходного слоя и нижней короны Солнца. Обнаружены различные проявления инверсий знака круговой поляризации в микроволновых спектрах излучения. Это явление проявляется в излучениях вспышечных активных областей (на разных стадиях развития, начиная с предвспышечной) и, вероятно, отражает глубинные процессы в них.

Рассмотрено несколько механизмов, которые приводят к двойной ин-

поляризация могут быть объяснены циклотронным тепловым излучением в поперечном магнит-



версии знака поляризации по частотному спектру и к эффекту “провала в спектре”. Подробно изучены: линейное взаимодействие волн в области квазипоперечного магнитного поля; распространение радиоволн через область с нулевым магнитным полем; распространение радиоволн через вышележащие токовые слои; рассеяние радиоволн при прохождении через волокна и магнитные дыры, в которых направление коронального магнитного поля меняет знак – на направление к наблюдателю. Результаты модельных расчетов теплового циклотронного излучения простейшей трехмерной горячей петли (тора) показали, что горячая корональная петля заметно влияет на характеристики излучения солнечной активной области на сан-

тиметровых и дециметровых волнах. Эти модели сопоставлялись с результатами наблюдений на РАТАН-600 для активных областей, в которых эффект инверсии поляризации был близок к расчетным.

ПРОГНОЗ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

На РАТАН-600 проводится программа мониторинга солнечной активности с использованием многоазимутального режима (по заявкам САО РАН, ГАО РАН, ИСЗФ) и идет формирование многоволновой базы данных активности в диапазоне 3–18 ГГц на различных этапах ее развития – предвспышечной, вспышечной и послевспышечной фазах.

Для прогноза вспышечной активности принят критерий Танаки – Еноме,

Многоволновые сканы активного Солнца. За одно сканирование диска получают спектры интенсивности и круговой поляризации во всех активных областях на диске. В течение 3 ч сделано до 60 сканов Солнца в диапазоне 3–18,2 ГГц на 80 частотах одновременно.

учитывающий уярчение потока излучения на волне 3 см относительно волны 8 см и его модернизированные версии для многоволновых наблюдений. Критерий удовлетворительно работает для мощных вспышек и протонных событий. Однако в связи с пониженной активностью 24 цикла проводился поиск адекватного критерия и для прогноза вспышек с меньшим рентгеновским классом М (а также класса С большого

Облучатели “на входе” солнечного приемного комплекса, установленные в кабине приемного зеркала № 3 радиотелескопа РАТАН-600 для многооктавного перекрытия частотного диапазона 0,75–18,2 ГГц. Они обеспечивают прием сигналов круговой поляризации с высокой точностью (лучше 0,1%).



уровня). На сайте Санкт-Петербургского филиала САО РАН (http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-pr?page=rat_search.ion) диагностика критерия осуществляется в автоматическом режиме. Продолжается работа по созданию комплексного критерия, в котором будут учитываться данные фотосферных наблюдений, данные ультрафиолетовых и рентгеновских наблюдений. На сайте САО РАН (<http://www.sao.ru/hq/sun/>) также ведутся регулярные измерения величины коронального магнитного поля Солнца для всех активных областей на диске, что уникально. Для повышения качества прогнозирования используются обнаруженные на РАТАН-600 особенности в спектрах поляризации активных областей в предвспышечном состоянии. Примечательно, что при каждом наблюдении на РАТАН-600 получают информацию о спектрах

интенсивности, а также о круговой поляризации практически для всех активных областей Солнца, присутствующих на диске; полученные данные говорят о величине коронального магнитного поля.

Спектрально-поляризационные данные радиотелескопа РАТАН-600 часто используются при проведении комплексных исследований (совместно с наблюдениями на космических аппаратах для изучения и прогноза солнечных, межпланетных и магнитосферных возмущений).

ПРИЕМНАЯ АППАРАТУРА

В 2011 г. завершена модернизация приемной аппаратуры для исследования солнечного радиоизлучения на РАТАН-600. Вдвое увеличено перекрытие частотного диапазона, которое сейчас достигает 0,75–18,2 ГГц. Частотное разрешение составляет 50–100 МГц, или около 1%. В сочета-

нии с большой эффективной площадью крупного радиотелескопа РАТАН-600 новая аппаратура предоставила новые возможности для исследования тонкой структуры радиоизлучения солнечной короны. В области солнечной радиоастрономии в настоящее время этот приемный комплекс является уникальным.

Результаты регулярных наблюдений Солнца проходят автоматическую обработку и выставляются в сети интернет на сайте: <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/> в оперативном режиме, через 4 мин после проведения наблюдения. На базе сервера в Санкт-Петербургском филиале САО РАН создан Центр анализа многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600. Он автоматически собирает информацию с многоволнового спектрографа облучателя № 3 на РАТАН-600, обрабатывает и представляет ее в удобном виде

для сопоставления с данными других наземных и спутниковых обсерваторий.

Для обеспечения высококачественных наблюдений Солнца весьма важно измерять и учитывать характеристики радиотелескопа. Детально исследовались поляризационные свойства антенной системы – как с помощью практических измерений, так и модельных вычислений. Высокая точность достигалась оптимизацией характеристик облучения антенной системы с использованием широкодиапазонных первичных облучателей. Важное место для работы радиотелескопа – юстировка (измерение точности отражательных панелей и их относительной привязки друг к другу). На радиотелескопе существует разнообразие методов юстировок для работы отдельных секторов инструмента. В связи с этим сейчас находятся в разработке методы, направленные на использование излучения геостацио-

нарных спутников Земли (в том числе и на основе технологии радиолокации).

Однако эффективность дальнейшего использования РАТАН-600 тормозится из-за ряда факторов: одномерность пространственного разрешения; ограниченная возможность проведения слежения за отдельным объектом на Солнце ввиду транзитной схемы инструмента; недостаточная точность формирования отражающей поверхности ввиду длительной эксплуатации, что связано с увеличением величины люфтов в механизмах перемещения.

Перспективы солнечных исследований связаны, главным образом, с проектом модернизации радиотелескопа в части перекрытия 8-октавного диапазона радиоволн (от 0,5 м до 3 мм); реализации режима слежения для задач по колебательным характеристикам солнечной плазмы.

Важным параметром для солнечной радиоастрономии будет освое-

ние миллиметрового диапазона волн, который оказался “неохваченным” крупными инструментами после начала работы радиотелескопа ALMA. Расширение рабочего диапазона 1–100 ГГц, высокое пространственное разрешение в сочетании с матричным картографированием и временными характеристиками превратят радиотелескоп РАТАН-600 в уникальный инструмент – как в области солнечной физики, так и в других областях астрономии.

Для полноценных исследований физики солнечной короны нужен крупный инструмент с высокими точностями по измерению поляризации, по координатным измерениям, с высокой чувствительностью в широком диапазоне волн.

Большое количество новых данных, обнаруженных с помощью РАТАН-600 при изучении процессов в плазме солнечной атмосферы, рассматривается как часть общей физической проблематики в астрономии.