

УДК 523.98:520.27

РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. I. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЗАДАЧИ

© 2011 В. М. Богод

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 июля 2010 г.; принята в печать 24 августа 2010 г.

В целях подготовки к исследованиям активного Солнца в 24 цикле солнечной активности, на радиотелескопе РАТАН-600 завершен очередной этап модернизации, который включал улучшение параметров многооктавного солнечного спектрально-поляризационного комплекса высокого разрешения (СПКВР), реализацию регулярных многократных наблюдений, представление и обработку данных наблюдений с использованием современных технических возможностей. В связи с этим представляется целесообразным провести некоторый обзор результатов, достигнутых на предыдущем приемном комплексе, и обсудить новые возможности в исследовании физики солнечной атмосферы, которые даёт новый комплекс.

Ключевые слова: *Солнце*

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоастрономический метод исследования солнечной атмосферы продолжает сохранять свою необходимость ввиду получения данных о параметрах активной плазмы на высотах, труднодоступных современным спутниковым методам. Проблема организации плазменных структур на различных пространственных масштабах в солнечной атмосфере является одной из центральных в современной физике Солнца. На корональных высотах она уже эффективно изучается в рентгеновском, ультрафиолетовом и гамма-диапазонах на спутниках SOHO, TRACE, RHESSI, HINODE, GOES. Наземные наблюдения ведутся в оптическом и радио окне прозрачности атмосферы Земли. Изучение тонких структурных образований в радиодиапазоне важно для понимания процессов зарождения плотной плазмы при образовании флоккулов, пятен, выхода нового магнитного потока [1–3], являющиеся источниками будущих мощных активных образований. Все многообразие структур, наблюдаемых в солнечной атмосфере, равно как и проявления солнечной активности в последние десятилетия связывались с солнечными магнитными полями. Их исследование (экспериментальное и теоретическое) и составило как бы центральную ось физики Солнца середины XX столетия. При этом физика Солнца часто являлась удобным полигоном для развития методов физики плазмы и исследование поведения горячей плазмы солнечной короны рассматривалось как возможный источник идей для решения технической проблемы управляемых термоядерных реакций. Богатство и разнообразие

процессов, происходящих на Солнце, требует адекватных инструментов для их изучения. Инструментарий, используемый для наблюдений Солнца, должен способствовать изучению проблем возникновения активности и ее распространению до верхних слоев атмосферы Солнца. Невозможно в принципе создать инструмент для решения всех задач, которые часто требуют многих предельных характеристик: температурных, временных и пространственных, поскольку это определяется технологическими, физическими и финансовыми возможностями реализации. Дополнительные требования налагаются условиями распространения излучения в солнечной атмосфере и гелиосфере. Механизмы излучения и переноса энергии практически всегда проявляются в совокупности, и задача их разделения также определяется техническими параметрами инструментов — чувствительностью и динамическим диапазоном, временным разрешением и временным перекрытием, пространственным разрешением и полем зрения, частотным разрешением и перекрытием по диапазону частот, поляризационными характеристиками и их точностью. Реализация предельных параметров требует применения крупных наземных инструментов, в условиях, определяемых прозрачностью и стабильностью земной атмосферы (оптический и радиодиапазон) и использования орбитальных обсерваторий (ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма диапазоны). Проблемы крупных инструментов часто связаны с трудностями реализации комбинаций перечисленных выше параметров. Отсутствие или невысокое качество одного из

параметров определяет круг изучаемых явлений с помощью данного инструмента. Например, отсутствие частотного анализа не позволяет исследовать процессы в широком диапазоне высот солнечной атмосферы, отсутствие временного разрешения не позволяет изучать резкую вспыхивающую фазу активных процессов, отсутствие спектрально-поляризационного анализа налагает ограничения на анализ высотной магнитной структуры, ограничения по пространственному разрешению приводят к усреднению исследуемых мелкомасштабных структур и т.д. В солнечной радиоастрономии наблюдения с высоким пространственным разрешением ведутся на ограниченном числе крупных инструментов. Следует отметить эффективность регулярных наблюдений в микроволновом диапазоне на радиогелиографе Нобеяма NoRH (Япония) на длинах волн 1.7 см и 0.8 см [4] и ССРТ (Россия) на длине волны 5.2 см [5], на радиогелиографе NRH (Нансей, Франция) в метровом диапазоне [6], который является основным поставщиком информации в метровом диапазоне о всплесках различных типов, шумовых бурях, корональных выбросах массы (КВМ) и др. Радиогелиограф в Нобеяма — пример специализированного инструмента для изучения радиоизлучения Солнца на длинах волн 1.7 см и 0.8 см. Удачная комбинация высоких временных и пространственных характеристик (одна карта Солнца за 50 мс) позволила получить в течение двух десятилетий множество новых данных по физике Солнца и стать одним из основных инструментов в солнечной радиоастрономии. Его успехи вдохновили радиоастрономов на создание широкодиапазонных инструментов подобного типа. Сейчас ведутся работы в США (идеи FASR [7]), в России (развитие ССРТ [8]), в Китае (создание CSRP [9]). Нет сомнений, что эти проекты заложат основы будущих масштабных исследований активности Солнца, проявляющейся в широком диапазоне высот солнечной атмосферы. Иногда проводятся наблюдения на крупном интерферометре VLA (США) на отдельных длинах волн [10]. Наблюдения на OVSA [11] проводятся в диапазоне 1–18 ГГц в целях изучения довольно ярких активных областей и вспыхивающих объектов. Радиотелескоп РАТАН-600 [12] представляет собой инструмент промежуточного типа. Это крупный инструмент рефлекторного типа, в котором сочетаются возможности широкого диапазона (многооктавного перекрытия) по частоте, высокой чувствительности по потоку радиоизлучения и высокой точности измерения поляризации с умеренными параметрами по пространственному 1D разрешению (от 12 угл. сек. на коротких длинах волн), по временным характеристикам (4 часа наблюдений с 4 минутным временным разрешением) и высокой регулярности (до 80% дней наблюдений в году). Последнее

свойство позволяет относить его и к специализированным солнечным инструментам. Комбинация ряда параметров РАТАН-600, которые трудно достичь на радиогелиографах, позволяет получать новую информацию о природе солнечного радиоизлучения [13].

Для повышения эффективности комбинаций параметров РАТАН-600, в рамках подготовки его к исследованиям активности в максимуме 24 цикла ведется работа по улучшению спектрально-поляризационного комплекса, ставятся задачи по расширению частотного диапазона в короткую (мм диапазон) и в длинноволновую (метровый диапазон) часть спектра.

Цель настоящей работы показать возможности инструмента, реализованные в задачах предыдущего максимума активности и наметить приложения новых его инструментальных возможностей для задач текущего максимума. Естественно, обзор, приведенный в данной работе, не может претендовать на полноту и отражает личную точку зрения автора.

2. О РЕАЛИЗАЦИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ В СОЛНЕЧНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

Солнце является мощным радиоисточником, и это обстоятельство существенно мешает достижению высокой чувствительности радиоприемных устройств, применяемых для исследований. Наиболее эффективным методом для изучения слабоконтрастных образований на Солнце является применение крупных радиотелескопов с большой эффективной площадью. Выше отмечалось, что среди перечисленных выше радиотелескопов, РАТАН-600 отличается большой собирающей площадью и широким частотным диапазоном. Другие параметры инструмента, такие, как пространственное и временное разрешение, не являются предельными и являются эффективными лишь в комбинации. В связи с необходимостью повышения пространственного разрешения (либо путем использования более коротких длин волн, либо путем увеличения размеров) представляет интерес установить связь между повышением пространственного разрешения и чувствительностью крупных радиотелескопов.

2.1. О чувствительности крупных инструментов

Известно, что мощный фоновый сигнал от уровня спокойного Солнца накладывает ограничения на величину минимально обнаружимого сигнала по потоку радиоизлучения. При этом другие параметры, определяющие чувствительность радиотелескопа, такие, как ширина полосы частот или

постоянная времени, часто необходимы исследователю для изучения спектральных и временных характеристик, и не могут рассматриваться. Поэтому наличие большой эффективной поверхности часто является единственной возможностью для достижения необходимой чувствительности. Чтобы оценить связь между размерами инструмента и его чувствительностью рассмотрим реакцию радиотелескопа данного размера на минимальный сигнал, попадающий в его двумерную диаграмму направленности.

В случае РАТАН-600, выражение для чувствительности по яркостной температуре можно записать:

$$\Delta T_B = \eta \times \Delta T_a = \eta \times \alpha \times T_{a\Sigma} \times R, \quad (1)$$

где $\eta = \Theta_D/\Theta_i$ — соотношение размеров двумерной диаграммы антенны Θ_{Dx}, Θ_{Dy} и источника круговой симметрии с размерами $\Theta_i = \Theta_x = \Theta_y$, ΔT_a — чувствительность по антенной температуре, $T_{a\Sigma} = T_{aN} + T_{aSun}$ — шумовая температура на входе радиометра при наблюдениях Солнца. Здесь T_{aN} — температура шумов радиометра, $T_{aSun} = (6 - 8) \times 10^3 K$ — антенная температура спокойного Солнца,

$$R = 1/\sqrt{\Delta f \times \tau} = 1/\sqrt{10^8 \times 0.2} = 2.2 \times 10^{-4}$$

радиометрический выигрыш при $\alpha \simeq 2$, $\Delta f = 10^8$ Гц и $\tau = 0.2$ сек.

В обычных наблюдениях при сканировании вертикальной диаграммой РАТАН-600 по диску Солнца $\Theta_{Dy}/\Theta_{Dx} = 60$ для источника с размерами $\Theta_i = \Theta_x = \Theta_y$ равными размеру горизонтальной диаграммы Θ_{Dx}/Θ_x , величины $\eta \simeq 60$ и $T_{a\Sigma} \simeq (6.5 - 8.5) \times 10^3 K$ определяют чувствительность по яркостной температуре на уровне $\Delta T_B \simeq (170 - 220) K$. На практике важно знание величины $6\Delta T_B \simeq (1100 - 1300) K$.

Чувствительность по потоку излучения определяется величиной

$$\Delta F = 2k \times \Delta T_a/S = 1.45 \times 10^{-3} s.f.u., \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана и S — эффективная поверхность радиотелескопа. Здесь $s.f.u. = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$.

Такая высокая чувствительность позволяет обнаруживать весьма слабые уярчения солнечной плазмы, например, возникающие на предвспышечной стадии активной области. Эффективная поверхность для сплошных рефлекторных телескопов в широком диапазоне частот определяется величиной КИП, который обычно падает в сторону коротких волн (для РАТАН-600 в диапазоне

1–10 ГГц он спадает с наклоном $dS/df = 0.02$). В случае использования интерферометрических систем эффективная поверхность определяется как $S = S_{single} \times \sqrt{N}$, где S_{single} — площадь одиночного зеркала [14]. Эта зависимость от частоты более резкая. Если учесть, что поле зрения радиогелиографов обычно несколько больше размера радиодиска Солнца, то геометрический размер одиночного зеркала для данной длины волны четко определен. Например, для длины волны 2 см диаметр одиночного зеркала составит около 2 м. Таким образом, чувствительность по потоку (2) можно оценить по количеству N одиночных зеркал. Если, например, используется 256 зеркал, то при укорочении длины волны вдвое для сохранения эффективной площади, число антенн должно возрасти до 1024. При этом следует учитывать, что неплотное заполнение синтезируемой поверхности площадью одиночных зеркал уменьшает значение S_{single} на множитель d^2/l^2 (здесь d и l , диаметр и расстояние между зеркалами), что также требует дополнительного увеличения их количества. Это сильно удорожает инструменты, в связи с чем используют комбинированные адаптивные методы наблюдений, например, применение временного накопления в зависимости от степени переменности объекта. Следует отметить, что в мире сейчас идет работа по созданию крупных радиогелиографов. Сделанные выше оценки указывают на трудности регистрации слабоконтрастных объектов на диске Солнца с помощью радиогелиографов, особенно если сбор информации организован последовательным переходом от одной частоты к другой. С другой стороны, на РАТАН-600 существуют проблемы идентификации радиоисточников, пространственно попадающих в большую вертикальную диаграмму радиотелескопа. Сейчас отношение вертикального размера к горизонтальному равно 60. Для относительно стабильных радиоисточников применим метод азимутального синтеза, который уменьшает это число до 8. Дальнейший прогресс, может быть достигнут адекватным сопоставлением радиоданных с данными спутниковых обсерваторий в ультрафиолете и мягком рентгене. Другим ограничением крупных радиоинструментов является трудность реализации параллельного анализа спектра. В случае рефлекторных инструментов (типа РАТАН-600 и др.) это является чисто технической задачей. Например, сейчас на нем реализован параллельный анализ спектра в диапазоне 1.7–40 см с частотным разрешением 1% и высокой поляризационной чувствительностью. Естественно, что развитие традиционных многоволновых антенных решеток должно привести к новым открытиям в солнечной физике. Однако для реализации важных возможностей плазменной диагностики в солнечной атмосфере

необходимо также наличие крупных инструментов, способных совмещать высокое пространственное разрешение с детальным спектральным анализом и высокочувствительными поляризационными наблюдениями. В перспективе эффективная комбинация инструментов с дополняющими друг друга параметрами поставит радиоастрономический метод на качественно новый уровень. Это будет способствовать существенному развитию знаний о физике Солнца и его влиянии на земные процессы.

2.2. О спектрально-поляризационных измерениях солнечного радиоизлучения.

Радиоастрономические наблюдения солнечной атмосферы остаются наиболее информативным способом получения данных о параметрах активной плазмы в широком диапазоне высот. Радиоизлучение хромосферы доступно наблюдениям в миллиметровом диапазоне радиоволн, переходной слой от хромосферы к короне и нижняя корона эффективно излучают в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. В этих слоях происходит резкое изменение температуры и плотности плазмы и для спокойной короны они находятся на высотах, близко прилегающих к фотосфере: от 1–2 тыс. км до 10–20 тыс. км. Считается, что магнитные поля распространяются в корону и их сложность в атмосфере определяется сложной структурой в фотосфере. Разработан ряд методов, использующих потенциальное приближение для расчета магнитных полей на различных корональных высотах. Однако, эти методы не учитывают генерацию магнитных полей вследствие сильных токов в короне, возникающих в активной плазме. Средняя и дальняя корона наблюдается, в основном, в виде нетеплового излучения в форме разнообразных всплесков различных типов. Эти слои сейчас также активно исследуются как в рентгеновском, так и в ультрафиолетовом диапазонах на специализированных спутниках. Активность часто меняет стратифицированное расположение слоев атмосферы Солнца ввиду наличия мощных МГД-возмущений, корональных выбросов масс, мощных потоков ускоренных электронов и протонов при вспышках и часто перед вспышками.

Изучение предвспышечной плазмы способствует пониманию процессов, приводящих к вспышке, а также выработке критериев прогноза вспышечной активности. Особый интерес представляет прогнозирование мощных вспышечных событий, оказывающих существенное влияние на состояние околоземного космического пространства. Из многих работ, посвященных вспышкам [15, 16] и др., известно, что вспышки возникают на некоторых высотах над фотосферой (например, хромосферные вспышки [17]) и в дальнейшем энергия вспышки распространяется вниз, где она проявляется

в виде уярчений на фотосфере, и вверх, где регистрируется на больших высотах в рентгеновском диапазоне. Изучение послевспышечной плазмы способствует пониманию процессов нагрева петель и созданию новых предвспышечных условий в активной области [18, 19]. Данные радиоастрономических наблюдений показывают, что в радиоизлучении активных областей, находящихся в стабильном состоянии, в основном преобладает циклотронный механизм радиоизлучения [20] в местах сильных магнитных полей над пятнами и тепловой тормозной механизм в местах вне пятен [21]. В случаях вспышечной плазмы активно работают нетепловые механизмы радиоизлучения, такие, как гиротронный на высоких гармониках гирочастоты [22], плазменные механизмы [23], мазерный механизм [24] и механизм переходного излучения плазмы [25]. Резкое изменение физических условий (температуры и плотности плазмы), появление особых магнитных конфигураций, токовых слоев и др. на высотах переходного слоя и нижней короны должно приводить к заметным изменениям поляризованного сигнала в зависимости, как от частоты наблюдения, так и от состояния активности. На предвспышечной стадии, как показано в [26, 27], возможны появления в поляризованном радиоизлучении устойчивых образований типа циклотронных линий. Резкие изменения структуры поляризованного излучения в зависимости от наблюдаемой частоты были зарегистрированы в активных областях, находящихся в активной стадии генерации вспышек [28, 29].

Следует отметить, что частотные изменения поляризованной структуры регистрировались и ранее [30] и авторы справедливо связывали их со вспышечной активностью. По анализу поляризованного излучения на двух длинах волн (3 и 8 см) были разработаны определенные критерии [31] предсказания протонных событий. Тонкие спектральные структуры в поляризованном излучении в микроволновом диапазоне были также обнаружены в сантиметровом диапазоне длин волн [32, 33] на РАТАН-600. В дециметровом диапазоне тонкие структуры в поляризованном излучении были обнаружены в радиоизлучении микровсплесков [34]. Широко поставлены наблюдения тонкой спектральной структуры в Швейцарии [35, 36] и Китае [37, 38], где ведутся патрульные наблюдения полного потока радиоизлучения в широком диапазоне радиоволн с высоким спектральным разрешением. Эти наблюдения проводятся для анализа тонкой структуры радиовсплесков в годы максимума активности, но тут существует проблема локализации области, в которой происходят данные события.

Изучение спектрально-поляризационных характеристик имеет свои особенности для каж-

дого крупного инструмента. Здесь весьма важна реализация как высокой чувствительности, так и высокой точности измерения степени круговой поляризации в широком диапазоне радиоволн. Низкое отношение сигнала к шуму и заметные кросс-поляризационные искажения свойственны радиогелиографам на основе интерферометров, в связи с чем в этих инструментах ошибки измерения степени поляризации достигают 5%. Тут необходимы специальные методы накопления сигнала, повышающие отношение сигнал/шум. Применение с этой целью крупного рефлекторного радиотелескопа РАТАН-600 оправдано, так как в нем практически легко реализуются высокие точности измерения степени круговой поляризации. При этом, измерения интенсивности и поляризации радиоизлучения происходят в одинаковых условиях, поскольку кросс-поляризационные искажения не превышают уровня шума системы при наблюдениях Солнца. Сложности возникают при необходимости перекрытия широкого диапазона частот в связи с использованием широкодиапазонных облучателей, в которых такие искажения уже присутствуют [39].

Строго говоря, РАТАН-600 занимает промежуточное положение, поскольку с одной стороны, прием ведется в типовой широкополосной рефлекторной системе, с другой, несимметричность его поверхности накладывает определенные ограничения на точность измерения поляризации. Опыт работы на радиотелескопе показывает, что кросс-поляризационные ошибки могут быть точно измерены, систематизированы и в ряде случаев сведены к уровню не превышающему шумов системы. Кроме того, существуют крупномасштабные кросс-поляризационные искажения, связанные с отклонением центра вертикальной диаграммы от центра диска Солнца при сканировании и искажения, связанные с малыми величинами негоризонтальности антенной системы [40] Плоского отражателя. Однако, во всех случаях они измеряются и учитываются при обработке наблюдательных данных.

Спектрально-поляризационные наблюдения являются приоритетными в солнечных исследованиях на РАТАН-600, и они явились основой для многих важных результатов, полученных как сотрудниками САО и ГАО, так пользователями других учреждений. В ходе подготовки к программам исследования максимума 24 цикла активности спектральное разрешение комплекса увеличено до 1% (число частотных каналов увеличено до 112) [41], улучшены методические возможности проведения многоазимутальных наблюдений, развито математическое обеспечение проведения многоволновых наблюдений и сбора данных [42], обработки и представления данных [43]. Спектрально-поляризационные наблюдения с новыми воз-

можностями при изучении высотной структуры магнитного поля методом стереоскопии указало на два важных качества, необходимых для реализации сходимости таких измерений [44]. Они заключаются в высокой позиционной точности при пассажных наблюдениях, достигающей долей угловой секунды и высокой монотонности спектральных измерений. Естественно, для проведения таких измерений нужна высокая чувствительность по потоку поляризованного излучения. Будущие спектрально-поляризационные наблюдения в 24 цикле активности должны продемонстрировать, насколько эффективны проведенные разработки.

2.3. Об измерении временных характеристик солнечного радиоизлучения.

Изучение динамических свойств отдельных образований является важной характеристикой любого солнечного инструмента. Этот параметр легко достигается на полноповоротных антеннах, но представляет определенные проблемы для крупных антенных систем. Для исследований временных и импульсных процессов от отдельного объекта на диске Солнца наиболее эффективно используются крупные радиогелиографы, обычно работающие на ограниченном числе длин волн. Здесь получены важные результаты по импульсной фазе вспышек. Уникальное свойство, присущее современным радиогелиографам, это возможность быстро (до 50 мс на NoRH) и длительное время регистрировать все пространственные гармоники инструмента и строить двумерную карту всего диска Солнца в течение светового дня. На радиотелескопе РАТАН-600 сейчас реализуются временные характеристики с максимальным перекрытием по времени около 4 часов вблизи местного полудня (7 UT до 11 UT) [45]. В будущем, этот интервал будет расширен до величины 6–12 UT. В штатных наблюдениях освоен многоазимутальный режим в течение 4 часов с проведением 61 прохождения Солнца с интервалом между сканами около 4 минут. В перспективе возможна реализация сочетание режима сопровождения объекта на диске Солнца и сканирования диска. В специальных случаях возможен режим наблюдений с максимально высоким быстродействием (около 1 мс/спектр) в течение 1.5–2 минут времени. В каждом конкретном случае наблюдений обычно требуются разные параметры инструмента. На Рис. 1 приведен пример многократных наблюдений Солнца в интенсивности I и в круговой поляризации V на нескольких длинах волн сантиметрового диапазона, сканы которого наложены друг на друга. В этот день на диске присутствовала активная область АО 9866 с двумя радиоисточниками А и В, временные характеристики интенсивности излучения которых были различны

(см. Рис. 1 в центре и Рис. 1 справа, здесь фоновый сигнал спокойного Солнца вычтен). На Рис. 2 слева показаны временные профили радиоисточника А. Справа приведен вейвлет-анализ временного поведения этого радиоисточника на тех же длинах волн. Четко выделяется период около 50 мин, спектральные свойства которого ясно указывают его уявление к коротким длинам волн.

Для достижения более высокого временного разрешения необходимо развивать режимы слежения за отдельной областью. Принципиальное решение этого вопроса состоит в создании безинерционной системы, сопровождающей объект. Сейчас ведется ее разработка.

2.4. О новых возможностях солнечного спектрального комплекса РАТАН-600 для исследования радиоизлучения атмосферы Солнца

В конце 2009 г. был завершен очередной этап подготовки радиотелескопа и комплекта солнечного оборудования для исследований в новом 24 цикле солнечной активности. Ниже мы перечислим основные его современные возможности, которые наиболее важны в их эффективном сочетании.

1. Многооктавное перекрытие частотного диапазона 0.75–18 ГГц.
2. Подробный параллельный спектральный анализ с частотным разрешением 1%.
3. Высокоточный поляризационный анализ с измерением предельной степени поляризации около 0.02–0.1 % на отдельных длинах волн и 0.5–1.5 % в широком спектре.
4. Большая эффективная площадь радиотелескопа (от 400 до 1000 м²).
5. Высокая чувствительность по потоку радиоизлучения (около 0.01 s.f.u. на диаграмму).
6. Многоазимутальный режим наблюдений, в котором реализуется временной анализ с разрешением 1 скан/4 минуты на протяжении 4 часов.
7. Регулярный мониторинг (около 80% дней наблюдений в году).
8. Режим многоволнового картографирования в режиме азимутального синтеза — 1 карта на нескольких десятках длинах волн в день.

3. СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600

Параметры нового комплекса, приведенные выше, значительно расширяют возможности исследований плазмы солнечной атмосферы с помощью РАТАН-600. Здесь мы укажем возможные направления таких исследований, соотнося их с уже полученными результатами в ходе предыдущего максимума активности. Поскольку радиоастрономический метод исследования солнечной атмосферы основан на частотной зависимости радиоизлучения, исходящего от слоев солнечной атмосферы, расположенных на различных высотах, то при наличии непрерывного спектрального анализа можно просмотреть всю толщу солнечной атмосферы, в которой формируются области будущего мощного энерговыделения. При этом весьма важен анализ поляризации принимаемого излучения, поскольку он несет в себе информацию о величине и структуре магнитного поля. Эффективность исследований солнечной атмосферы сегодня также резко возросла благодаря комплексным исследованиям со спутниковых обсерваторий SOHO, TRACE, RHESSI, HINODE, GOES, которые несут регулярную информацию о более высоких слоях по наблюдениям в рентгеновском, ультрафиолетовом и гамма-диапазонах.

В радиодиапазоне, для понимания процессов зарождения активной плазмы в нижней короне, весьма ценным является спектральное изучение тонких структурных образований, для чего необходимо применять инструменты с высоким пространственным разрешением и с большой эффективной поверхностью. Рассмотрим некоторые результаты исследований солнечного радиоизлучения, демонстрирующие эффективность наблюдений на РАТАН-600 за период предыдущего максимума солнечной активности. В течение этого времени использовался солнечный спектрально-поляризационный комплекс ССПК с 5% пространственным разрешением в диапазоне от 1 до 16 ГГц. Реализованная флуктуационная точность поляризационных измерений достигала 0.02%. В ряде наблюдений использовался режим многоазимутальных наблюдений с перекрытием по времени 4 часа вблизи центрального меридиана с интервалом между наблюдениями около 4 минут.

4. МИКРОВСПЛЕСКИ

При наблюдениях микровсплесков на РАТАН-600 была реализована предельная чувствительность в дециметровом диапазоне волн, достигшая величины около 10^{-3} s.f.u. [46]. Это позволило обнаружить импульсные источники нового типа, свидетельствующие о длительном

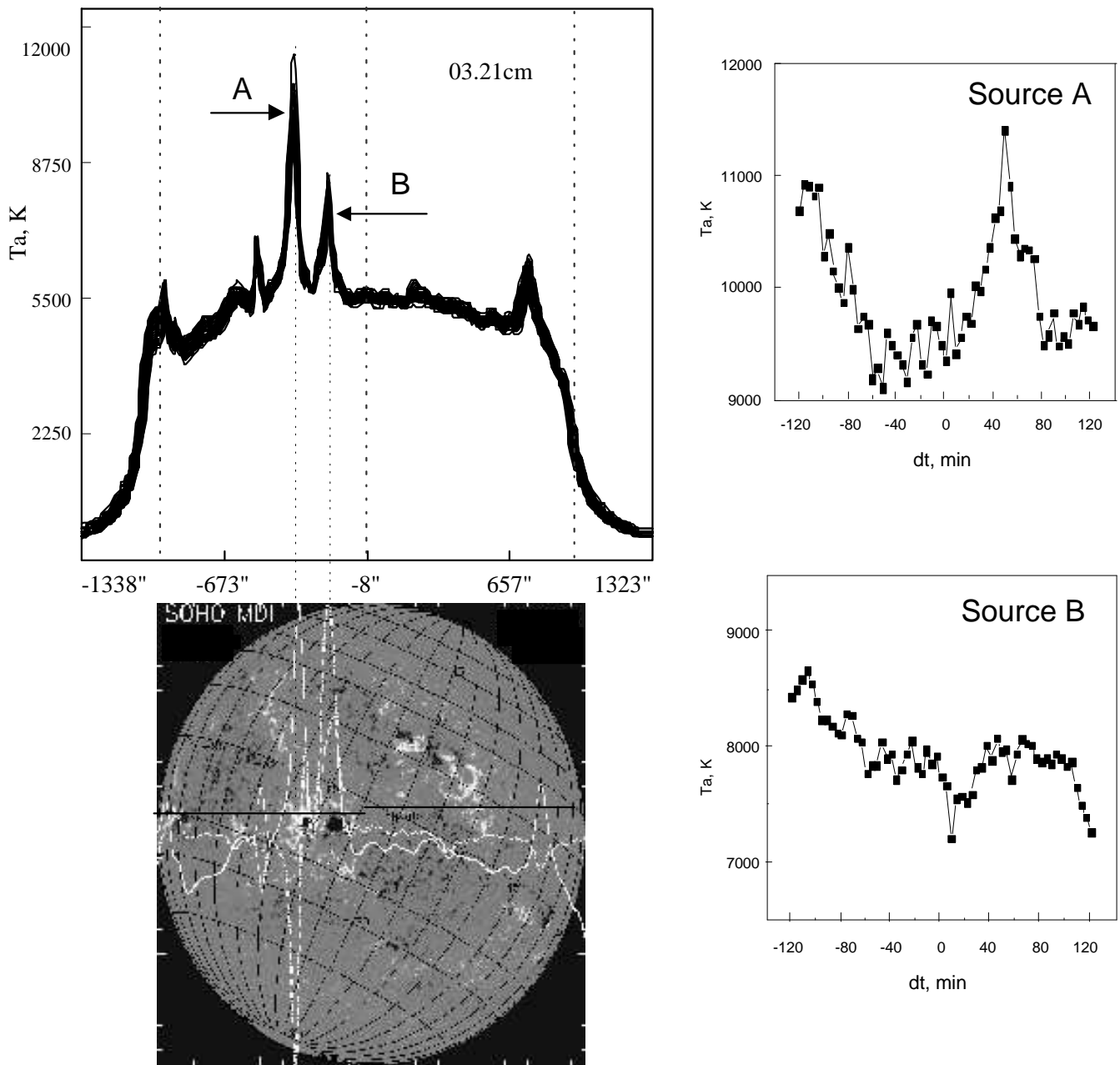


Рис. 1. Временные характеристики активной области АО 9866 с двумя радиоисточниками А и В. Слева представлены сканы интенсивности и круговой поляризации на длине волны 3.21 см. Внизу для сопоставления приведена магнитная карта по данным спутника SOHO MDI, в центре и справа приведены изменения в интенсивности источников А и В в течение 240 минут, которые показывают их различное поведение со временем.

выделении энергии нетепловой природы в активных областях. На основе метода многоазимутальных наблюдений на РАТАН-600 были организованы продолжительные (до 4 часов) и многоволновые регистрации в дециметровом диапазоне, по которым были найдены прямые доказательства существования длительного нетеплового излучения в магнитосфере солнечной активной области (гало) [47–49]. Было показано также, что радио-

излучение микровсплесков в активных областях Солнца является проявлением излучения шумовых бурь на фундаментальной плазменной частоте и возникает в результате распространения неустойчивостей в вершинах корональных петель. Шумовая буря представляется как крупномасштабное активное образование, охватывающее слои солнечной атмосферы от десятков до нескольких сотен тысяч км над фотосферой [50]. Таким образом,

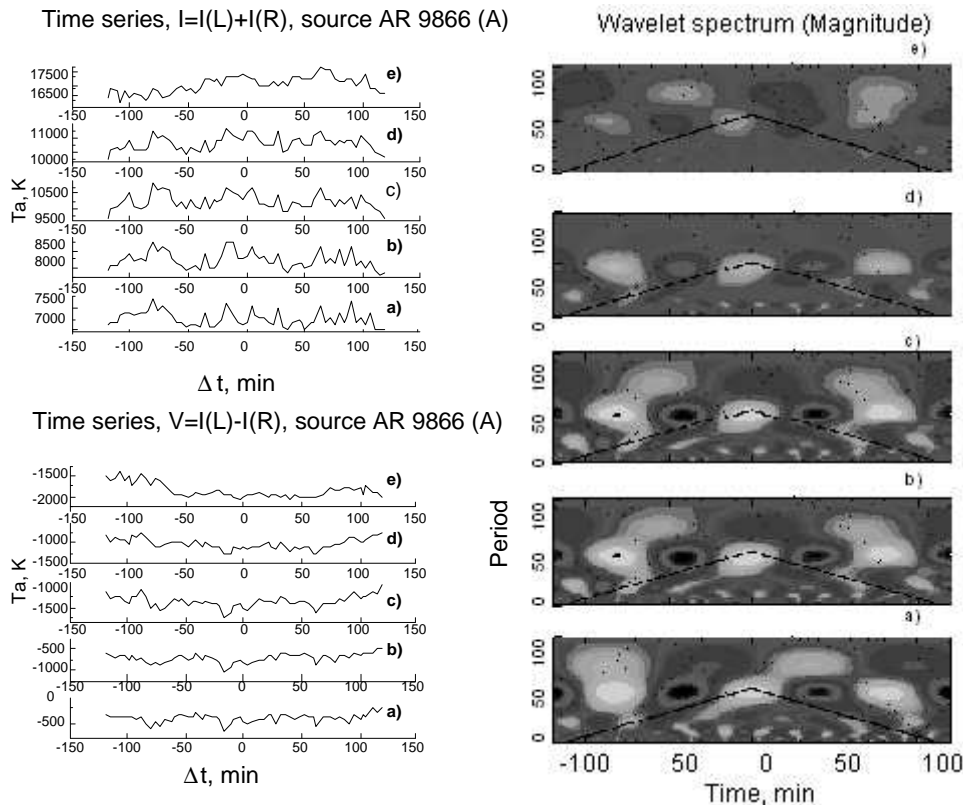


Рис. 2. Тонкая структура временного поведения источника А в активной области АО9866 на нескольких частотах сантиметрового диапазона: а) 15.6 ГГц, б) 14.7 ГГц, в) 13.4 ГГц, г) 12.9 ГГц, е) 9.35 ГГц. Слева вверху временные профили в интенсивности, внизу профили в круговой поляризации. Справа приведен вейвлет-анализ колебательных характеристик на этих же частотах. Хорошо видны 20- и 50-минутные колебания и их зависимости от частоты.

была уточнена природа гало в активной области на дециметровых волнах, которая указывала на существование длительной континуальной компоненты (дециметровое гало) и всплесковой компоненты (всплески и микровсплески). Модельные расчеты, согласованные с наблюдениями, показали, что такое длительное нетепловое излучение может возникать при нелинейном взаимодействии плазменных волн на верхнегибридной частоте. Создана методика диагностики физических параметров плазмы в области генерации длительного нетеплового излучения активных областей [51]. На Рис. 3 приведен пример регистрации микровсплесков на фоне континуального радиоисточника (вверху) и за вычетом континуального источника (внизу). Будущие исследования микровсплесковой компоненты в дециметровом диапазоне, выполненные с повышенным частотным разрешением нового комплекса, позволят подробно исследовать переходную область, существующую между местами излучения S-компоненты и всплесковой компоненты и прояснить механизм выделения энергии в вершинах арочных структур.

5. АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ

По спектрально-поляризационным наблюдениям Солнца в микроволновом диапазоне с 5% частотным разрешением на РАТАН-600 был выделен класс вспышечно-продуктивных активных областей, в которых генерируются мощные события, соответствующие уровням М и X рентгеновского излучения. Эти области характеризуются резкими инверсиями круговой поляризации в сантиметровом диапазоне по частоте и по времени на интервале от нескольких часов до трех суток. Проведенные исследования [52, 53] указывают на существование длительной предшествующей фазы в предвспышечном излучении активных областей. Обнаружены разнообразные особенности вспышечного излучения активной области в сантиметровом диапазоне радиоволн. Они включают: многократные инверсии знака круговой поляризации по частотному диапазону (см. Рис. 4), регистрацию восхода нового магнитного потока в коротковолновой части спектра [54], проявление эффекта потемнения микроволнового излучения в отдельных активных областях [55]. Эти эффекты проявляются в основном, в диапазоне длин волн от 2 до 5 см и зависят

SUN_A-12: 1999/05/19: 31.41[cm]

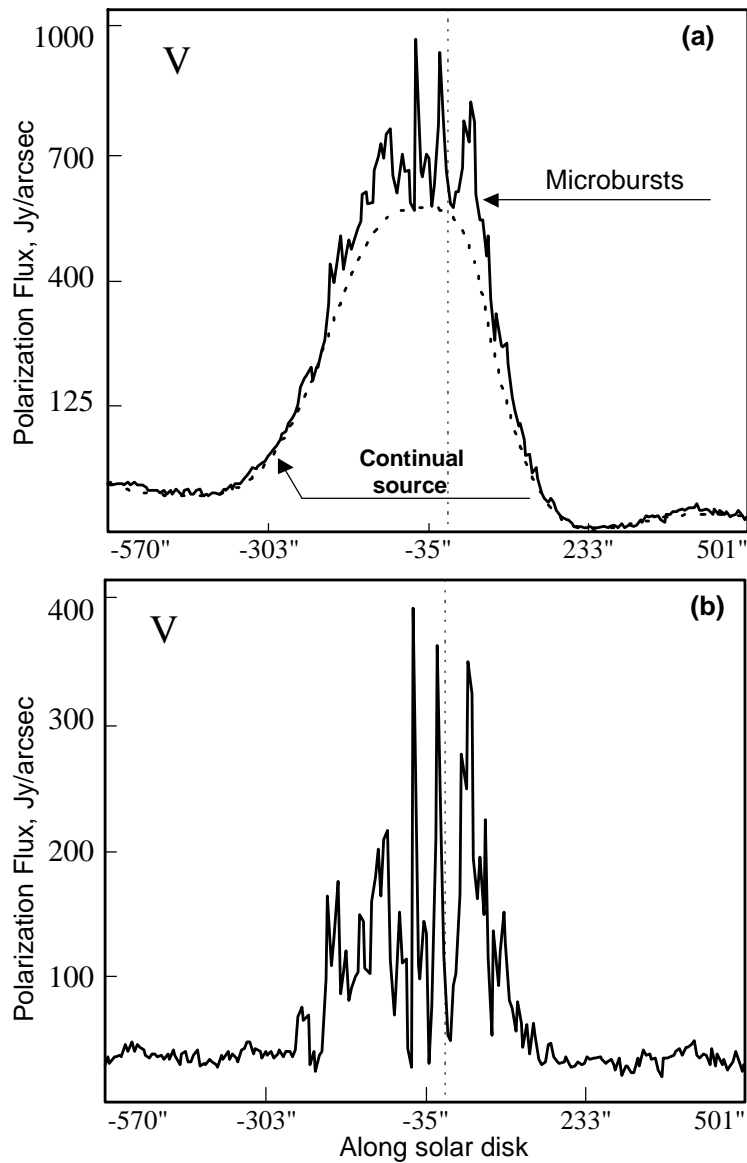


Рис. 3. Дециметровое излучение в активной области на волне 31.41 см. Вверху приведен скан активной области, в которой выделяется всплесковая и континуальная компоненты. Внизу приведена выделенная микровсплесковая компонента [51].

от типа активной области. Для некоторых активных областей они подтвердились наблюдениями в двумерном изображении на волне 5.2 см по данным ССРТ [55]. Всё это указывает на непрерывные процессы накопления энергии и предварительного разогрева магнитосферы активной области в широком диапазоне высот. Эти данные противоречат некоторым современным всплещечным моделям, основанным на относительно стабильных, хотя и сложных магнитных арочных структурах [56]. На это же указывается и в работе [57] по наблюдениям в радио (NRH) и рентгеновском (RHESSI) диапазонах. На Рис. 4 приведен пример регистрации типичной всплещечно-активной области с много-

кратными сменами знака круговой поляризации по частотному диапазону.

Природу многократных инверсий поляризации по частотному диапазону в активной области еще предстоит выяснить, для чего важно проводить наблюдения одновременно с большим перекрытием по частотному диапазону и с высоким частотным разрешением. Созданный новый спектрально-поляризационный комплекс обладает частотным разрешением в 5 раз выше предыдущего, и это должно позволить подробнее изучить тонкую структуру активных областей, генерирующих мощные всплещечные события на Солнце в ходе максимума активности нового 24

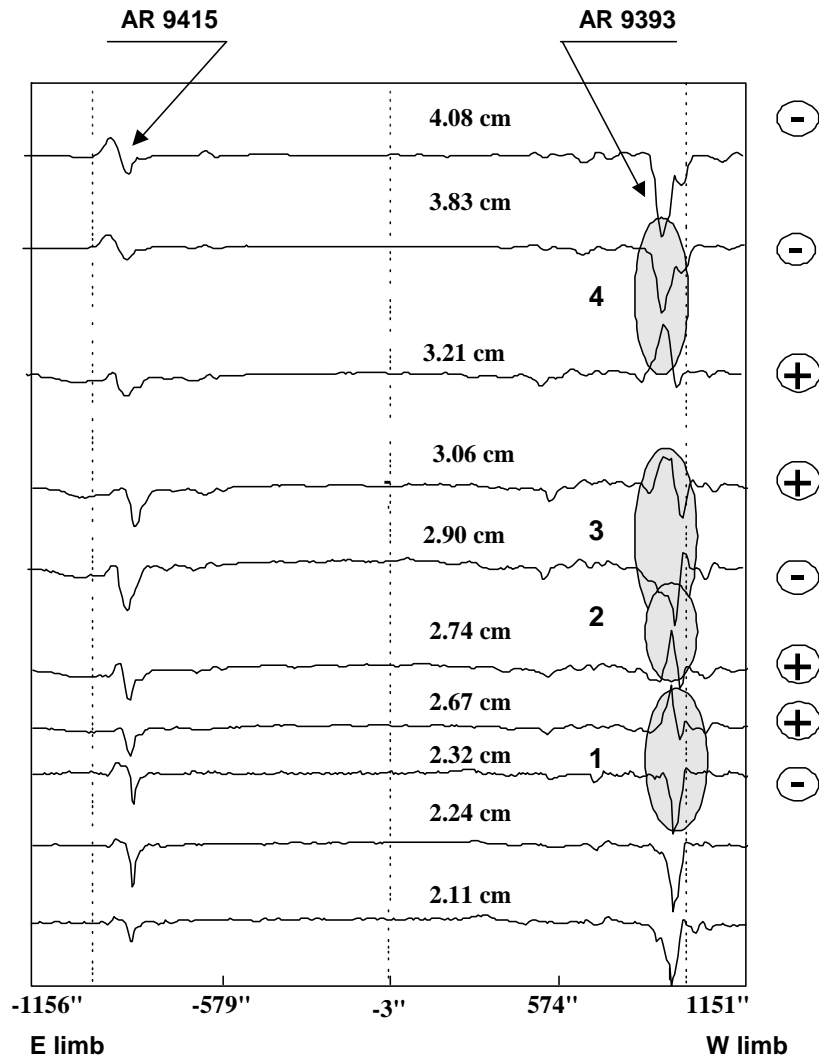


Рис. 4. Пример многочастотного скана диска Солнца выполненного с одномерной диаграммой РАТАН-600 с 5% частотным разрешением. В интервале длин волн от 2.11 до 4.08 см одновременно регистрировались 4 инверсии знака круговой поляризации (показаны овалами и цифрами) в активной области AR 9393, находившейся на западном краю диска Солнца 30 марта 2001г. Напротив, в активной области AR 9415 на восточном лимбе никаких изменений знака поляризации не происходило.

цикла. Интересно отметить, что все особенности вспышечных активных областей, проявляющиеся в сантиметровом диапазоне, практически всегда сопровождаются микровсплесками в дециметровом и метровом диапазонах волн [50]. Установление связи между излучениями медленноменяющейся и всплесковой компонентами радиоизлучения в активных областях должно стать одной из задач при исследованиях в максимуме 24 цикла.

6. ЦИКЛОТРОННЫЕ ЛИНИИ

В ходе наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 в максимуме 23 цикла активности Солнца активной области AR 7962 были получены экспериментальные доказательства существования циклотронных линий излучения, предсказанных ранее В.В. Железняковым и Е.Я. Злотник [58].

Линия была обнаружена на фоне гладкого частотного спектра локального источника, связанного с пятнами. Наблюдения с высоким разрешением по частоте выделили узкую деталь на длине волны 8.5 см. Обнаруженная линия имела полосу излучения 10–12% с яркостной температурой 10^7 К [59]. На Рис. 5 представлены наблюдения спектров активной области AR 7962 с 11 по 14 мая 1996 г.. 11 и 12 мая в спектре интенсивности и поляризации (параметры R и L) был зарегистрирован импульсный радиоисточник. При сопоставлении с двумерной картой радиогелиографа на длине волны 1.7 см в Нобейма радиоисточник на сканах РАТАН-600 был отождествлен с ярким диффузным радиоисточником, который распался в течение 13 и 14 мая. Соответствующее изменение произо-

шло и в спектрах, в которых исчезло спектральное уярчение на волне 8.5 см. Результат интерпретирован как тепловое циклотронное излучение на третьей гармонике электронной гирочастоты от компактного источника, содержащего плотную горячую плазму.

Повышение частотного разрешения спектрально-поляризационного комплекса РАТАН-600 в 5 раз (до 1%) будет способствовать дальнейшему развитию исследований в данном направлении.

7. КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАСС

Многоволновые наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 позволяют регистрировать явления, связанные с зарождением корональных выбросов массы (КВМ), непосредственно на диске Солнца. Такие наблюдения возможны благодаря высокой чувствительности по потоку радиоизлучения и возможности спектральных наблюдений, что позволяет определять параметры плазменной среды, важные для прогнозирования таких событий. Корональные выбросы массы на расстояниях 5–10 радиусов Солнца регулярно наблюдаются на космической обсерватории SOHO с помощью внезатменных коронографов LASCO. Однако наблюдение выбросов корональных масс на диске Солнца встречает определенные трудности. Регулярные и многократные радионаблюдения с высоким пространственным разрешением могут быть весьма результативными в таких исследованиях. Пример наблюдений мощной активности Солнца в первой половине ноября 2004 г. приведен на Рис. 6. На РАТАН-600 наблюдения этих событий проводились в диапазоне длин волн 1.83–15 см с анализом интенсивности и круговой поляризации излучения [60]. Весь период активности определялся активностью одной вспышечно-продуктивной активной области АО 10696, в которой произошло 11 вспышек уровня М и 2 вспышки уровня Х в рентгеновском диапазоне.

На Рис. 6 приведено изменение полного потока интенсивности радиоизлучения АО 10696 на длине волны 2.24 см за весь период наблюдений со 2 по 13 ноября 2004 г., которое сопоставлено с изменением площади, занимаемой пятнами в данной активной области. Видно, что после вспышки 7 ноября поток радиоизлучения стал падать значительно быстрее, чем суммарная площадь пятен. Данные, приведенные на Рис. 6, интерпретируются как внезапное исчезновение объема корональной излучавшей плазмы существовавшей до 7 ноября. Сопоставление с данными Space Weather Highlight, в которых сообщено о выбросе корональных масс со скоростью 1800 км/сек 8 ноября, подтверждает наш результат и указывает на возможность регистрации

выбросов корональных масс с помощью микроволновых измерений излучения. Исследования КВМ наиболее эффективны при комплексных наблюдениях, включающих наблюдения в радиодиапазоне на ССРТ, NoRH, РАТАН-600, в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах с использованием коронографа SOHO (LASCO) [61, 62].

8. ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Изучение динамических свойств отдельных солнечных образований и получение многооктавных спектров интенсивности и круговой поляризации для переменного объекта является определяющим при изучении физики всего активного процесса. Для реализации частых наблюдений на РАТАН-600 используется режим многократных наблюдений Солнца в азимутах (с интервалом 4 минут) в течение до 4 часов. Он основан на перемещении вторичного зеркала в системе Южного сектора с Перископом по дуговым рельсам и одновременных перемещений основного отражателя и Перископа [45]. Диаграмма радиотелескопа в этом режиме одномерная (т.е. вертикальный размер в 60 раз больше горизонтального), что часто является удобным для наблюдений всех объектов, находящихся в центральной активной зоне Солнца. Максимальный угол разворота диаграммы по азимуту достигает ± 8 град от меридиана и может использоваться для построения многочастотной двумерной карты для стабильных объектов. На Рис. 7 слева сопоставлены многократные сканы, полученные в течение 4 часов с 4-минутным интервалом на длине волны 3.21 см. В центре и справа приведены временные характеристики активной области AR 10898 для интенсивности I и круговой поляризации (параметр V) соответственно.

Режим исследования временного поведения различных спектральных образований на Солнце требует точного управления диаграммой радиотелескопа в различных азимутах и постоянно совершенствуется. Установка нового спектрального комплекса в антенной системе Южного сектора с Перископом при высоком качестве азимутальных наблюдений может быть эффективным инструментом для изучения переменности спектральных и поляризационных характеристик различных плазменных образований в солнечной атмосфере.

9. ВЫСОТНАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Радиоастрономический метод исследования Солнца позволяет получить информацию о высотной структуре объектов солнечной атмосферы.

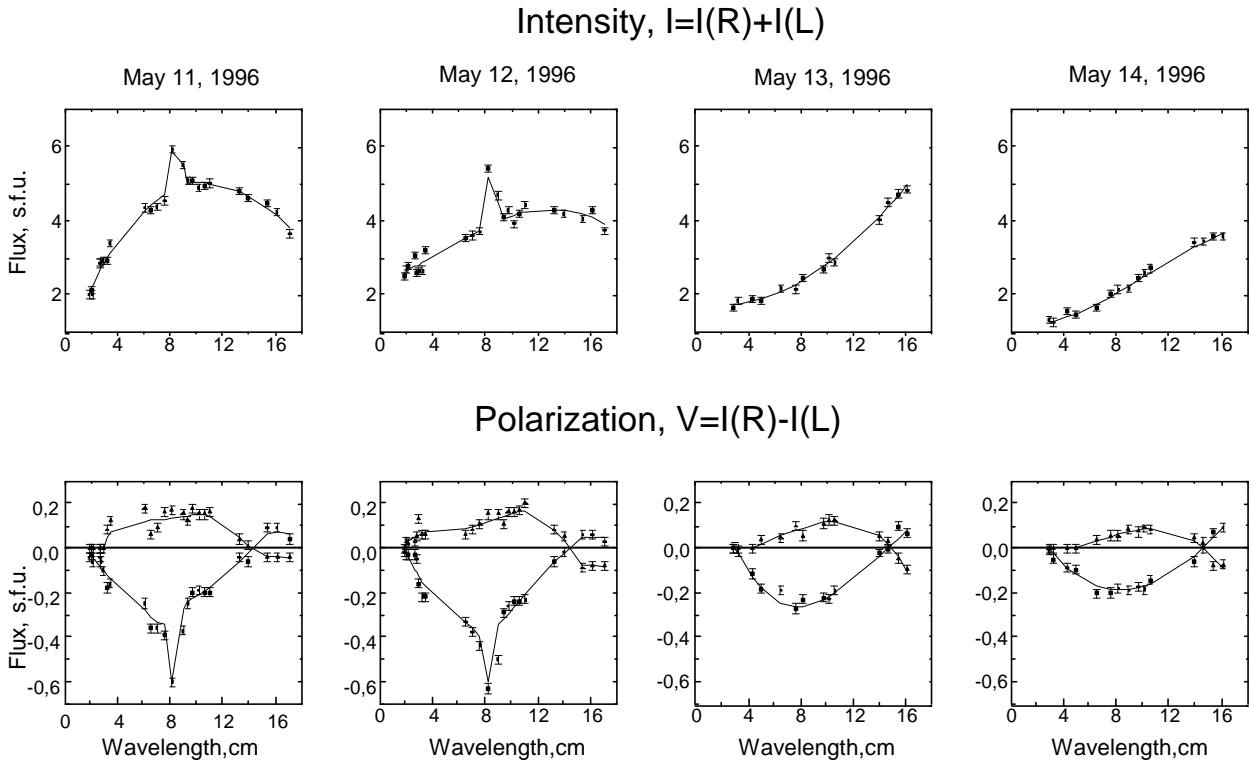


Рис. 5. Изменение спектра активной области AR 7962 с 11 по 14 мая 1996г. Вверху — спектры потоков интенсивности излучения активной области. Внизу — спектры для правой и левой поляризованных компонент излучения. Пик в спектре правой поляризации указывает на существование циклотронной линии излучения.

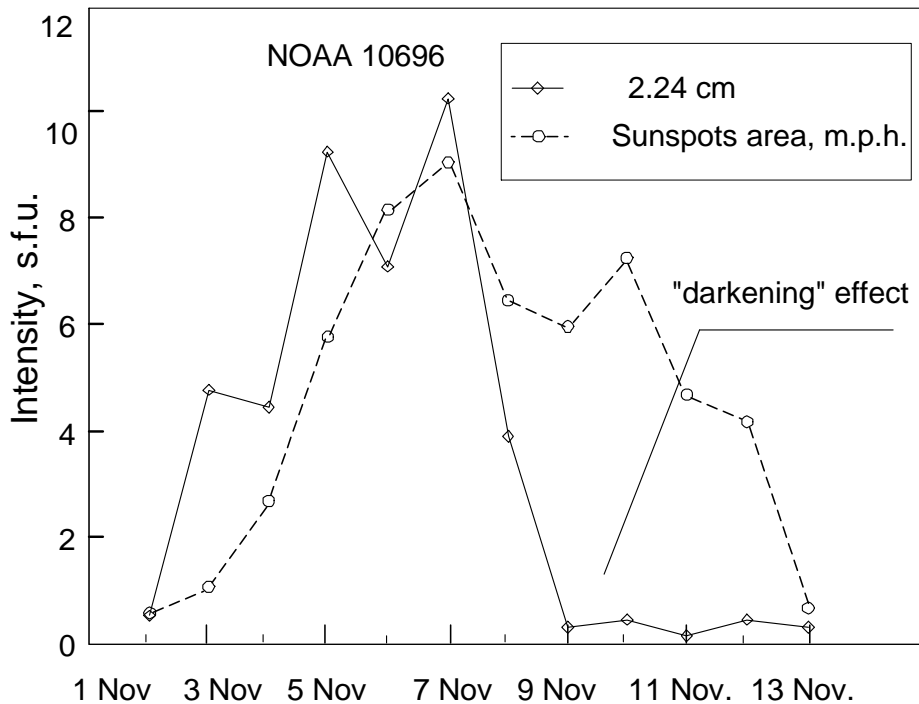


Рис. 6. Сравнение потока интенсивности радиоизлучения на длине волн 2.24 см и величины площади пятен группы NOAA 10696 в период со 2.11.2004 по 13.11.2004. Видно резкое уменьшение сигнала интенсивности после вспышки X2.0 7 ноября.

Sun: 2006/07/06 08:43 UT 3.21 cm

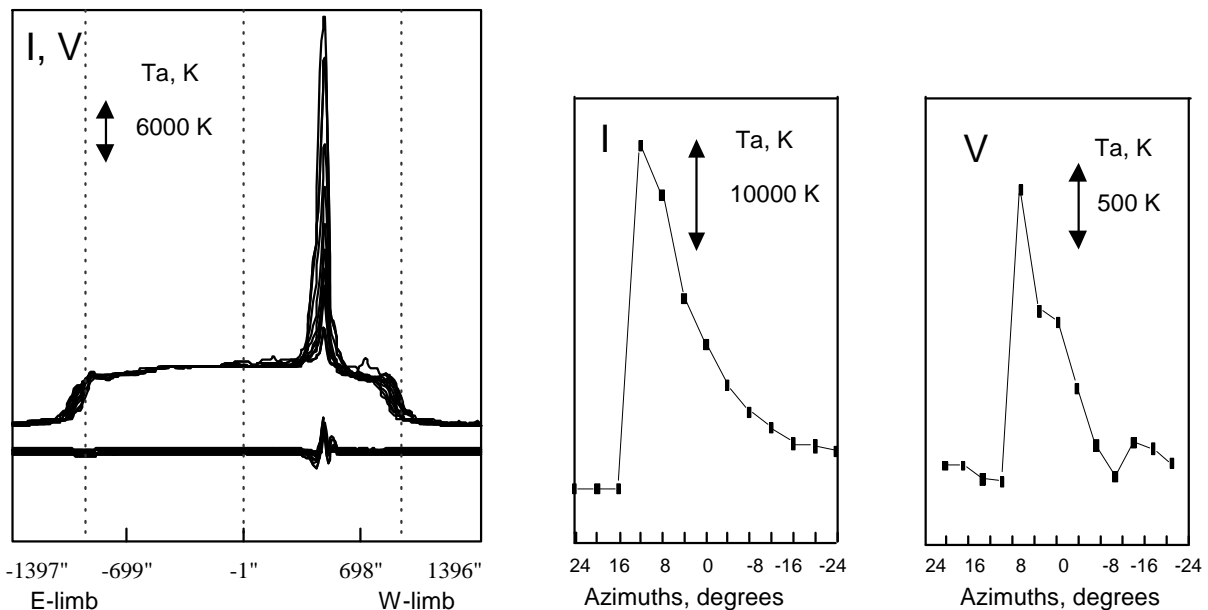


Рис. 7. Пример наблюдения динамики активной области AR 10898 во время вспышки. Слева — наложение сканов Солнца на длине волны 3.21 см в интенсивности и круговой поляризации в течение 4-х часов наблюдений с интервалом в 4 минуты. В центре изменение во времени интенсивности, справа — поляризации.

Это следует как из стратифицированных моделей Солнца, в которых основные параметры атмосферы (температура, плотность и магнитное поле) меняются монотонно с высотой, так и из измеряемых высотных характеристик плазмы при перемещении радиоисточников по диску Солнца. Для реализации таких наблюдений необходимы высокие характеристики инструмента по пространственному разрешению, по координатной точности и многоволновости. Для этих измерений применим метод стереоскопических наблюдений Солнца [63, 64]. Этот метод может быть эффективен при комбинации его с многочастотными регистрациями поляризованного излучения радиоисточников в широком частотном диапазоне. Высоту коронального магнитного поля можно определять из сопоставления скорости перемещения пятна на уровне фотосферы со скоростью перемещения соответствующего поляризованного радиоисточника микроволнового излучения. Сканы диска Солнца выполняются на РАТАН-600 с высокой координатной точностью, что позволяет применить их для детального изучения высотной структуры излучения радиоисточников над пятнами. Пример интересной двумерной структуры магнитного поля над пятном в активной области АО 0953 по радионаблюдениям на РАТАН-600 в мае 2007 г. приведен на Рис. 8. Здесь структура магнитного поля имеет форму расходящейся спирали над стабильным пятном. В различных наблюдениях зарегистрировано большое разнообразие структур

магнитных полей, среди которых часты спиралевидные формы.

Развитие метода стереоскопических измерений по многоволновым спектрально-поляризационным наблюдениям весьма перспективно для оценки структуры магнитного поля в короне активных областей, который дает не только изменение напряженности магнитного поля с высотой, но и определяет двумерную форму силовых трубок, излучающих в микроволновом диапазоне длин волн. Применение нового спектрально-поляризационного комплекса в программах наблюдений максимума 24 цикла будет способствовать развитию методов высотных измерений в солнечной атмосфере, что является уникальным.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены некоторые интересные результаты наблюдений, выполненные на РАТАН-600 в ходе предыдущего максимума активности. В настоящее время создан новый спектрально-поляризационный комплекс для исследования радиоизлучения солнечной атмосферы с многооктавным перекрытием по частотному диапазону и высоким спектральным разрешением, что в сочетании с другими параметрами (чувствительностью и точностью измерения поляризации и координат) предоставляет исследователям новые наблюдательные возможности. Особые надежды

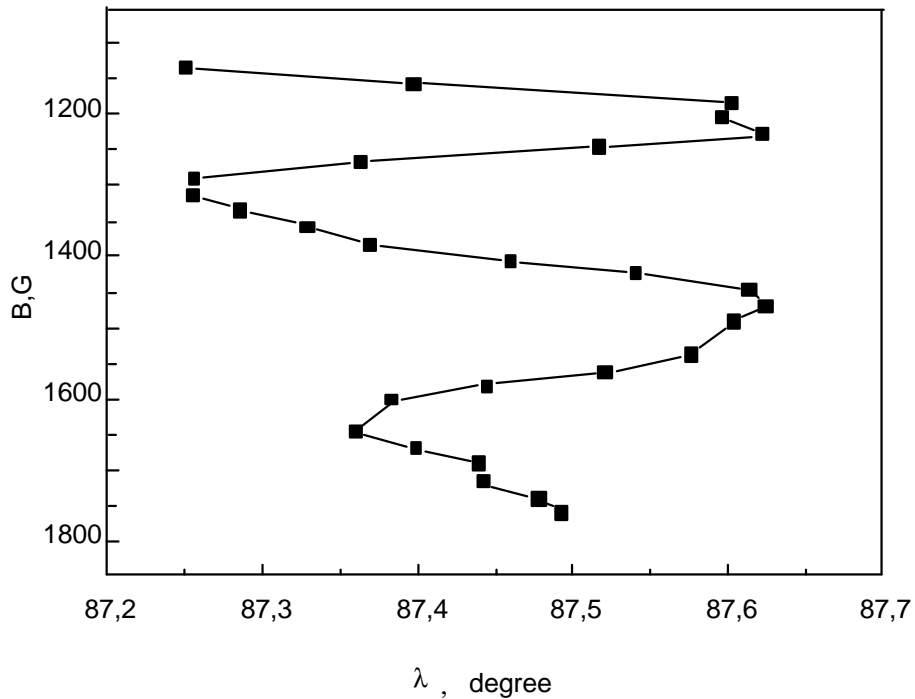
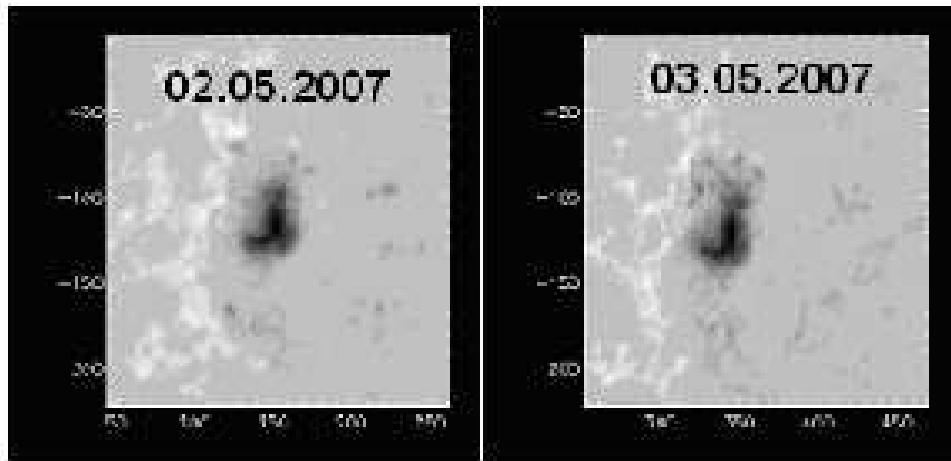


Рис. 8. Пример измерения высотной структуры магнитного поля по спектрально-поляризационным наблюдениям АО 0953, сделанным с 1% частотным разрешением [44]. По оси абсцисс отложена гелиодолгота активной области. Справа приведены оптические магнитограммы активной области, демонстрирующие ее стабильность.

мы возлагаем на получение данных по трехмерной структуре солнечной атмосферы (магнитное поле, плотность и температура плазмы). Возможность в будущем достичь высокой точности сопровождения выбранного объекта позволит изучать тонкие колебательные характеристики в объектах с различной излучательной способностью — от радиогрануляции [65] до протонных событий [66]. Спектрально-поляризационные наблюдения Солнца могут быть использованы

для дальнейшего развития методов солнечной стереоскопии и эмиссионной томографии с целью реконструкции трехмерной структуры солнечных образований [67, 68]. Это позволит изучить по проекциям объектов в условиях солнечной короны как пространственное распределение меры эмиссии и температурных градиентов, вертикальную структуру магнитного поля, так и характер неоднородностей основных структурных элементов по собственному радиоизлучению в сантиметровом и

дециметровом диапазоне длин волн. Такие данные могут быть использованы для трехмерного моделирования областей спокойного Солнца, корональных дыр и магнитосфер активных областей над пятнами, в результате чего будет возможно уточнить физические механизмы, ответственные за нагрев короны и цикличность солнечной активности. В последние годы интенсивно развиваются методы сейсмологии с использованием колебательных характеристик солнечной поверхности. Применение этих методов в радиодиапазоне позволит понять процессы распространения радио- и МГД-волн и механизмы их генерации в нижних слоях солнечной атмосферы.

11. ВЫВОДЫ

В работе проанализированы некоторые результаты, полученные в исследованиях Солнца по наблюдениям предыдущего максимума 23 цикла солнечной активности. В ходе подготовки к исследованиям Солнца в новом 24 цикле на РАТАН-600 создан уникальный приемный комплекс, который описан в статье Богода и Гараимова [41], создана высокоскоростная система сбора многоканальных данных и разработано математическое обеспечение обработки данных наблюдений, представленная в статье Балдина и др. [42], создана система скорости трансляции данных на удаленные серверы с развитым матобеспечением представления и обработки данных, описанная в статье Тохчуковой [43].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор и коллектив выражают благодарность ряду программ и фондов, финансовая поддержка которых способствовала реализации столь крупной работы. Среди них особо следует отметить гранты РФФИ (08-02-00378а и 11-02-00072), Программы ПАН-16 и ОФН-15, программы ЦКП Минобрнауки и Госкомгидромета. Автор приносит извинения за неполноту представленных задач для постановки будущих исследований на РАТАН-600, ввиду невозможности охвата всего перечня направлений, которые, тем не менее, могут быть весьма эффективны в исследованиях 24 максимума активности Солнца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солнечные вспышки*, под ред. В. Е. Степанова (Наука, Москва, 1982).
2. A. I. Podgorny and I. M. Podgorny, *Astronomy Reports* **52**, 666 (2008).
3. V. V. Somov, *Solar System Research* **40**, 85 (2006).
4. H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome, et al., *Astronom. and Astrophys.* **16**, 437 (1995).
5. V. V. Grechnev, S. V. Lesovoi, G. Ya. Smolkov, et al., *Solar Phys.* **216**, 239 (2003).
6. K. Alain and J.-M. Delouis, in *Proceedings of the CESRA Workshop*, Ed. by G. Trottet (Springer, Paris, 1997), p. 192.
7. T. S. Bastian and D. E. Gary, *Journal of Geophysical Research* **102**, 14031 (1997).
8. V. V. Grechnev, S. V. Lesovoi, G. Ya. Smolkov, et al., *Solar Phys.* **216**, 239 (2003).
9. Y. Yan, J. Zhang, W. Wang, et al., *Earth, Moon and Planets* **104**, 97 (2009).
10. K. R. Lang and R. F. Willson, *Bull. Amer. Astronom. Soc.* **16**, 929 (1984).
11. D. E. Gary and G. J. Hurford, *Astronom. J.* **420**, 903 (1994).
12. Ю. Н. Парийский, Д. В. Корольков, О. Н. Шиврис и др., *Астрон. ж.* **53**, 1017 (1976).
13. В. М. Богод, *Известия АН, Серия физическая* **59** (7), 138 (1995).
14. Н. М. Цейтлин, *Антенная техника и радиоастрономия* (Соврадио, Москва, 1976), с. 193.
15. Л. А. Пустильник, *Астрон. ж.* **50**, 1211 (1973).
16. H. E. Petchek, in *On the physics of the flares* (NASA Sci. Techn. Inform. Div., Washington, 1964), p. 425.
17. С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер и В. Н. Цытович, *Физика плазмы солнечной атмосферы* (Наука, Москва, 1977).
18. I. Y. Grigoryeva, V. N. Borovik, M. A. Livshits, et al., *Solar Phys.* **260**, 157 (2009).
19. В. Н. Боровик, В. Е. Абрамов-Максимов, И. Ю. Григорьева и др., в *Трудах XI Пулковской Международной конференции по физике Солнца* (Санкт-Петербург, Пулково, 2007), стр. 69.
20. Sh. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Solar Phys.* **79**, 41 (1982).
21. V. M. Bogod and G. B. Gelfreikh, *Solar Phys.* **67**, 58 (1980).
22. G. D. Fleishman and V. F. Melnikov, *Astrophys. J.* **587**, 823 (2003).
23. G. D. Fleishman and V. F. Melnikov, *Astrophys. J.* **584**, 1071 (2003).
24. K. Yu. Platonov and G. D. Fleishman, *Astronomy Reports* **45**, 203 (2001).
25. G. D. Fleishman, *Astronomy Letters* **27**, 254 (2001).
26. В. В. Железняков и Е. Я. Злотник, *Астрон. ж.* **57**, 773 (1980).
27. V. Zheleznyakov and E. Zlotnik, *Solar Phys.* **68**, 317 (1980).
28. В. М. Богод и С. Х. Тохчукова, *Письма в АЖ* **29**, 305 (2003).
29. В. М. Богод и С. Х. Тохчукова, *Космические исследования* **44**, 1 (2006).
30. М. М. Kobrin, A. I. Korshunov, S. I. Arbuzov, et al., *Solar Phys.* **56**, 359 (1978).
31. H. Tanaka and S. Enome, *Solar Phys.* **40**, 123 (1975).
32. В. М. Богод, *Известия РАН, Серия физическая* **70**, 1491 (2006).
33. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Solar Phys.* **255**, 253 (2009).
34. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astronomy Reports* **45**, 643 (2001).

35. A. O. Benz, C. Monstein, and H. C. Meyer, *Solar Phys.* **226**, 143 (2005).
36. P. Messmer, A. O. Benz, and C. Monstein, *Solar Phys.* **187**, 335 (1999).
37. H.-R. Ji, Q.-J. Fu, Y.-H. Yan, et al., *Chinese Journal of Astronom. and Astrophys.* **5**, 433 (2005).
38. Q. Fu, Yu. Liu, H. Ji, et al., in *Proceedings of Nobeyama Symposium No 479* (1980).
39. А. Н. Коржавин, В. М. Богод, В. И. Гараимов и др., в *Тезисах конференции “Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России”* (САО РАН, Нижний Архыз, 2008), с. 49.
40. D. V. Korolkov and Yu. N. Parijskij, *Sky and Telescope* **57**, 4 (1979).
41. В. М. Богод, А. М. Алесин и А. А. Перваков, *Астрофизический бюллетень* (в печати).
42. С. В. Балдин и В. И. Гараимов, *Астрофизический бюллетень* (в печати)
43. С. Х. Тохчукова, *Астрофизический бюллетень* (в печати).
44. В. М. Богод и Л. В. Яснов, *Астрофизический бюллетень* **64**, 372 (2009).
45. В. М. Богод, Г. Н. Жеканис, М. Г. Мингалиев и С. Х. Тохчукова, *Известия ВУЗов. Серия Радиофизика* **47**, 1 (2004).
46. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astrophys. Trans.* **20**, 459 (2001).
47. V. M. Bogod, C. Mercier, and L. V. Yasnov, *Journal Geophysical Research* **106**, 25353 (2001).
48. T. I. Kaltman, A. N. Korzhavin and N. G. Peterova, in *IAU Symposium No 223*, Ed. by A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, and A. G. Kosovichev (Cambridge, Cambridge University Press, 2004), p. 263.
49. T. I. Kaltman, A. N. Korzhavin, N. G. Peterova, et al., *ASP Conf. Series* **155**, 140 (1998).
50. L. V. Yasnov, V. M. Bogod and A. G. Stupishin, *Astrophysical Bulletin* **62**, 369 (2007).
51. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astronomy Reports* **49**, 144 (2005).
52. S. Kh. Tokhchukova and V. M. Bogod, *Solar Phys.* **212**, 99 (2003).
53. V. Bogod and S. Tokhchukova, in *ESA, SP-506* (Prague, 2002), p.279.
54. В. М. Богод, *Известия РАН. Серия физическая* **70**, 1491 (2006).
55. S. Kh. Tokhchukova and V. M. Bogod, *Solar Phys.* **212**, 99 (2003).
56. H. Yoichiro, *Solar Phys.* **165**, 275 (1996).
57. M. R. Kundu, V. V. Grechnev, S. M. White, et al., *Solar Phys.* **260**, 135 (2009).
58. V. V. Zheleznyakov and E. Ya. Zlotnik, *Solar Phys.* **121**, 449 (1989).
59. V. V. Zheleznyakov, *Astrophys. Space Phys. Rev.* **3**, 157 (1984).
60. И. С. Веселовский, М. И. Панасюк, Г. А. Базилевская и др., *Космические исследования* **42**, 453 (2004).
61. V. V. Grechnev, V. G. Zandanov, A. M. Uralov, et al., *Solar Phys.* **225**, 379G (2004).
62. N. N. Kardapolova, T. P. Borisevich, N. G. Peterova, and S. V. Lesovoi, *Astronomy Reports* **52**, 409 (2008).
63. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 434 (1994).
64. M. J. Aschwanden, J. Lim, D. E. Gary, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **454**, 512 (1995).
65. В. М. Богод и Д. В. Корольков, *Письма в АЖ* **1**, 25 (1975).
66. Ю. И. Ермолаев, Л. М. Зеленый, Г. Н. Застенкер и др., *Геомагнетизм и аэрономия* **45**, 1 (2005).
67. В. М. Богод, А. С. Гребинский, Л. В. Опейкина, *Изв. ВУЗов. Серия Радиофизика* **39**, 1450 (1996).
68. V. M. Bogod and A. S. Grebinsky, *Solar Phys.* **176**, 67 (1997).

RATAN-600 RADIO TELESCOPE IN THE 24TH SOLAR-ACTIVITY CYCLE. I. NEW OPPORTUNITIES AND TASKS

V.M. Bogod

Regular upgrade of the RATAN-600 radio telescope has been completed in order to prepare the instrument for the studies of the active Sun during the 24th solar-activity cycle. The upgrade included the improvement of the parameters of of the multi-octave solar spectral and polarization analyzer, realization of regular multiple observations, and the use of modern capabilities for the representation and processing of observational data. In this connection, there appear to be sufficient reasons to review the results obtained using the previous version of the receiving equipment and discuss the new capabilities in the study of the physics of the solar atmosphere provided by the new analyzer.

Key words: *Sun: activity—techniques: radar astronomy*