

На правах рукописи

Топчило Николай Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АТМОСФЕРЫ
НАД СОЛНЕЧНЫМИ ПЯТНАМИ
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В САНТИМЕТРОВОМ
ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент
Нагнибеда Валерий Георгиевич

Официальные оппоненты: Боровик Валерия Николаевна,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Главная (Пулковская) астрономическая обсер-
ватория РАН,
научный советник

Снегирев Сергей Донатович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Федеральное государственное бюд-
жетное научное учреждение "Научно-
исследовательский радиофизический инсти-
тут",
директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт земного маг-
нетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Защита состоится "16" мая 2017 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном универ-
ситете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университет-
ский пр. 28., ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М.
Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адре-
су: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте:
<https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/YtdRfVjGd5.pdf>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Миланова Ю. В.

Диссертация посвящена исследованию физических характеристик атмосферы над солнечными пятнами по результатам спектрополяриметрических микроволновых наблюдений.

Актуальность темы. Присутствие магнитных полей в атмосфере Солнца является одним из важных ее особенностей и главным структурообразующим фактором. Практически все структурные элементы солнечной атмосферы, за исключением разве что фотосферной грануляции, связаны с наличием в или вокруг них магнитных полей (МП). При этом сама величина МП (составляющая от единиц до тысяч гаусс) не является решающим фактором для образования солнечных структур, но она сильно влияет на их энергетику и динамику. И здесь наиболее выдающимся объектом являются солнечные пятна. Их сильные МП оказывают влияние на структуру атмосферы на всех высотах, от короны до подфотосферных слоев (Вильсоновская депрессия). Солнечные пятна играют определяющую роль в развитии активных областей (АО) – источников солнечных вспышек. И хотя сами пятна достаточно редко участвуют во вспышечных процессах, но наиболее мощные вспышки происходят именно при тесном взаимодействии пятен, а безпятенные АО вспышек практически не дают. Также солнечные пятна как единый компактный объект, охватывающий все основные слои солнечной атмосферы, являются удобной лабораторией для исследования поведения плазмы в широком диапазоне температур и плотностей.

Хотя регулярные наблюдения Солнца начались еще в середине XIX века, исследование магнитной природы солнечной активности начались только с 1908 г., когда Джордж Хейл обнаружил в спектре пятен зеемановское расщепление спектральных линий. Исследования в спектральных линиях показали, что атмосфера над пятнами отлична от атмосферы над спокойным Солнцем, она более холодная, а МП пятен проникают далеко в хромосферу. Данные радиоастрономии, возникшей в 50-х годах прошлого века, показали, что и выше, в короне, МП пятна остаются компактным образованием с температурой в миллионы градусов (несколько ранее в 1942 г. Элден идентифицировал линии высоко ионизованных атомов и оценил температуру короны в миллион градусов).

В связи с развитием пилотируемой космонавтики с конца 50-х годов значительно повысился интерес к изучению Солнца, в особенности к происходящим на нем активным процессам, и исследование Солнца из чисто научного направления приобрело важное прикладное значение. Активно развивалась служба Солнца, как оптическая, так и радиоастрономическая, строились радиотелескопы разного типа на различные диапазоны

длин волн, как небольшие для измерения интегрального потока (всплесков), так и крупные для изучения характеристик различных типов солнечных образований. Начиная с 1973 г., значительный объем информации о солнечной активности (в том числе и о АО) в УФ и рентгеновском диапазоне предоставила серия космических аппаратов (Skylab, SMM, Yohkoh, SOHO, TRACE, Hinode, Коронас-Фотон, IRIS, STEREO, SDO). К началу XXI века успешное развитие спутниковых наблюдений с их хорошим угловым разрешением, почти непрерывным временным заполнением и огромным объемом информации заметно снизило роль наземных наблюдений. Однако, попытки решить проблемы солнечной активности (в особенности предсказание солнечных вспышек) путем исследования исключительно корональной составляющей атмосферы пока не привели к заметным успехам.

Вторым магистральным направлением развития в последнее время стало численное моделирование структуры атмосферы снизу, из-под фотосферных слоев, до уровня короны, исходя из «первых принципов» методами радиационной магнитогидродинамики (типа Bifrost code). Этим путем предполагается значительно продвинуться в решение многих проблем, в том числе в проблеме нагрева атмосферы Солнца. Для проверки проводимых расчетов большие надежды возлагаются на наблюдения, как на новых наземных оптических телескопах, угловое разрешение которых за счет применения адаптивной оптики и спекл-реконструкции составляет доли угловой секунды (SST, BBSO/NST, KIS/VTT&GREGOR и др.), так и на только что введенном в строй радиоинтерферометре ALMA, работающем в субмм диапазоне. В случае, если это произойдет и удастся организовать более-менее регулярные наблюдения, то это может перекрыть диапазон коротких волн от субмм до примерно 9 мм (до 8 тыс. К по спокойному Солнцу). Правда, в настоящее время полосы 1 и 2, перекрывающие длинноволновую часть диапазона ALMA еще не готовы. Более длинные волны должен был обеспечить проект FASR (диапазон частот 30 MHz – 30 GHz, частотное разрешение 1-0.1%), который, к сожалению, вероятно не будет реализован. Некоторым утешением может служить строящийся радиоинтерферометр EOVSА (1–18 GHz, разрешение на 17 ГГц – 3"). Но он имеет небольшое число антенн и, вероятно, будет регистрировать только яркие источники. На стадии завершения находится строительство похожего на FASR спектрогелиографа в Китае CSRH (переименован в MUSER) (0.4–15 ГГц), который в настоящем виде немного не дотягивает до миллиметрового диапазона. К сожалению, в 2013 г. закрылся проект модернизации VLA – EVLA (1-50 ГГц), который хотя и не предназначен для солнечных наблюдений, но благодаря высокому угловому разрешению даже единичные наблюдения на VLA дают ценную информацию о структуре

источников. Среди крупных специализированных радиотелескопов, регулярно наблюдавших Солнце в радиодиапазоне, в настоящее время работают: радиогелиографы: NoRH (Нобейяма, Япония, волны 1.76 и 0.88 см), ССРТ (Россия, волна 5.2 см, идет модернизация по увеличению числа частот в диапазоне 4–8 ГГц), NRH (Нансе, Франция, метровый диапазон), и радиотелескоп РАТАН-600 (ст.Зеленчукская, Россия, 0.75–18 ГГц).

Хотя нижние слои солнечной атмосферы – верхняя фотосфера, хромосфера и переходная область видны в оптических и УФ линиях, использование радиоизлучения для их исследования имеет определенные преимущества, так как в спокойном состоянии (при отсутствии вспышек) эти слои находятся в состоянии ЛТР относительно радиоизлучения, и радиотелескоп работает фактически как термометр, а при наличие магнитных полей и как магнитометр.

К настоящему времени существуют различные модели атмосферы над солнечными пятнами. В основном они базируются на результатах оптических и УФ наблюдений (см. обзор Solanki 2003 и более новые работы Socas 2007, Fontenla 2009). Немногочисленные же наблюдения пятен, выполненные с высоким пространственным разрешением в мм (ВІМА, 3.5 мм) и коротковолновой части см диапазона (VLA, 15 ГГц) зачастую не соответствуют ни одной из имеющихся моделей, что явно требует их пересмотра Loukitcheva 2014, Iwai 2016. Пересмотр же моделей должен быть основан, прежде всего, на результатах новых наблюдений, выполненных с большим пространственным разрешением и в более широком (в основном в более длинную сторону) диапазоне длин волн.

В целом, в литературе случаев наблюдений активных групп и солнечных пятен с высоким пространственным разрешением можно встретить достаточно много (порядка 50 на VLA и WSRH), но все они имеют весьма существенные недостатки:

- встречаются в основном сложные случаи: раздробленные пятна, многопятенные комплексы, активные области в фазе вспышечной активности;
- используется небольшое число частот и ограниченный диапазон длин волн (как правило, отсутствуют короткие волны);
- почти нет учета и исследования динамики активной области (зависимости от изменения угла зрения при повороте Солнца и изменений во времени);
- слабая поддержка наблюдениями в других диапазонах (большинство наблюдений старые, выполненные еще в доспутниковую эпоху).

Значительная часть указанных недостатков вызвана отсутствием инструментов, специализирующихся на исследовании Солнца, работающих в широком диапазоне длин волн и одновременно обладающих хорошим пространственным разрешением. Как было отмечено, создание таких инструментов пока задача будущего.

Другой подход к проблеме состоит в подборе максимально простых благоприятных для анализа случаев, когда возможно разделение различных эффектов и простое моделирование на основе наблюдений на инструментах с умеренными характеристиками. Мы в своем исследовании опирались на наблюдения, выполненные, в основном, на радиотелескопе РАТАН-600 и радиогелиографах NoRH и CCRT. Пространственное разрешение этих инструментов уступает VLA и WSRT, однако у них есть то важное преимущество, что наблюдения ведутся регулярно и имеются огромные архивы, что позволяет производить целенаправленный отбор наблюдательного материала для оптимального решения той или иной поставленной задачи.

Цель и задачи работы. Основной целью данной работы являлось выяснение некоторых физических особенностей структуры атмосферы над солнечными пятнами, которые еще остаются недостаточно исследованными и которым пока уделяется недостаточное внимание. Мы полагаем, что они могут быть эффективно изучены с помощью имеющихся в настоящее время инструментов, что важно как для анализа активно разрабатываемых сейчас теоретических моделей солнечной атмосферы, так и для обеспечения эффективного использования вновь создаваемых крупных солнечных радиотелескопов. При этом главным приоритетом является раскрытие и максимальное использование возможностей крупных отечественных инструментов, таких как РАТАН-600 и РТ-32.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Исследование особенностей параметров атмосферы над пятнами на основе данных радиотелескопа РАТАН-600 о случаях аномальных спектров пятенных источников в коротковолновой части сантиметрового диапазона, которая не охвачена регулярными наблюдениями на других инструментах. Результаты решения данной задачи на примере нескольких АО представлены во второй главе.
- Получение двумерных изображений пятен с высоким пространственным разрешением по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопе

РТ-32 и их анализ с точки зрения соответствия модельным представлениям об особенностях радиоизображений пятен при наблюдении под большими углами.

Решение задачи по результатам трех затмений описывается в третьей главе.

- Проведение на основе архива наблюдений РАТАН-600 поиска и подбора случаев наблюдения пятен, радиоизлучение которых показывает наибольшее соответствие основным теоретическим представлениям о поведении пятенных источников и анализ возможных причин отклонений от ожидаемого поведения у «нестандартных» пятен.

Решение задачи подробно описано в четвертой главе.

Научная новизна работы. Работы по исследованию активных образований на Солнце начались с самого момента возникновения радиоастрономии во второй половине XX века. Во второй половине 70-х годов благодаря созданию крупных радиотелескопов и радиоинтерферометров появилась возможность разделить АО на отдельные пространственные образования, в том числе выделить и исследовать излучение отдельных пятен. При этом значительное преимущество радиоинтерферометров в пространственном разрешении и двумерности получаемых радиоизображений со временем оттеснило на второй план использование крупных одиночных антенн для исследования объектов с малыми угловыми размерами. В нашей работе для исследования характеристик солнечных пятен мы постарались использовать имеющиеся преимущества радиотелескопа РАТАН-600: большой диапазон принимаемых частот (0.8–30 см), высокое частотное разрешение (до 200 МГц), длинные ряды непрерывных наблюдений, сочетание, которое трудно получить при использовании интерферометров.

Работа проводилась по трем направлениям, большинство полученных результатов являются оригинальными или существенно уточняющими существующие представления.

1. Исследование случаев «аномальных» параметров атмосферы над солнечными пятнами по данным спектрально-поляризационных наблюдений с высоким частотным разрешением на РАТАН-600:

- *Впервые* по результатам наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 крупных солнечных пятен в активных областях NOAA 10105, NOAA 10325 и ряде других АО обнаружены «потемнения» в о-моду радиоизлучения на коротких сантиметровых волнах в диапазоне 1.76–2.27 см, яркость которых ниже уровня спокойного Солнца. Ранее (Nagnibeda 1987) считалось, что в радиодиапазоне пятна из ярких

становятся темными (как в оптике) в мм-диапазоне на волнах короче 3–4 мм.

- Наличие «потемнения» подтверждено наблюдениями депрессии радиоизлучения на радиогелиографе Нобеяма на волнах 1.76 см и 8.8 мм, а также наблюдениями на 2.6 мм и 3.5 мм на 45-м радиотелескопе обс. Нобеяма и на 2.0 см на VLA. Наблюдения потемнений также соответствует изображениям хромосферы в линии К CaII и He I 10830 Å. Наличие «потемнения» плохо согласуется с современными моделями атмосферы солнечных пятен и вероятно потребует их пересмотра.
- По предварительным данным установлено, что потемнение наблюдается в период ± 3 дня от момента прохождения пятном центрального меридиана Солнца. Для крупных пятен период наблюдения может быть больше.
- Обнаружена связь потемнения с открытыми линиями магнитного поля. Сопоставление участков депрессии для небольшого числа пятен с открытыми линиями магнитного поля, рассчитанными по PFSS-модели показало, что связь обнаруживается в 50% случаев.
- Благодаря высокому пространственному и частотному разрешения радиотелескопа РАТАН-600 для ряда пятен выявлено скачкообразное изменение структуры изображения пятненного источника в *o*-моду в диапазоне 2.3–2.7 см, сопровождающееся резким увеличением размера и яркостной температуры источника. Толщина слоя, в котором происходит этот скачок, по оценкам в рамках дипольной модели магнитного поля пятна составляет менее 1.5 тыс. км.
- Анализ полученных на радиотелескопе РАТАН-600 спектров яркостных температур и радио размеров ряда пятен показал, что простая модель атмосферы с дипольным МП в плоскопараллельной среде, где температура растет с высотой, а излучение в *o*-моду генерируется на 2-й гармонике гирочастоты, а в *e*-моду на 3-й, не может удовлетворить наблюдательным данным во всем диапазоне длин волн. Для устранения противоречивости яркостных температур *o*- и *e*-мод, требуется чтобы часть излучения в *o*-моду генерировалась на 3-м гироуровне.
- По результатам численного моделирования параметров атмосферы над пятном в АО 10325 и частотным спектром, полученным на радиотелескопе РАТАН-600, показано, что депрессии радиоизлучения вызваны понижением плотности и электронной температуры по всей высоте атмосферы над пятном.
- Приведены свидетельства заметного влияния на параметры атмосферы

ры над пятном и на характеристики его радиоизлучения динамических явлений типа течений: вытекание вещества вдоль открытых линий МП и втекание вдоль закрытых силовых линий (видимые в EUV петли и протуберанцы).

2. Построение и анализ изображений пятен с высоким пространственным разрешением по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН (исследованы два пятна на волнах 3.5, 6.2 и 13.0 см в NOAA 11140 (поток $F_{6.2} = 3$ с.е.п. ($0.01 F_{sun}$), тень 15–20'') и в NOAA 12303 (поток $F_{6.2} = 1$ с.е.п. ($0.003 F_{sun}$), тень 10'')):

- *Впервые*, благодаря использованию крупных полноповоротных радиотелескопов РТ-32, в затменных наблюдениях достигнуто предельное угловое разрешение в 1–3'', что продемонстрировано на примере 2-х *небольших* солнечных пятен (поток пятен $\sim 0.01 - 0.003 F_{sun}$).
- Показано, что для обоих пятен квазидвумерные распределения радиояркости качественно соответствуют традиционным моделям циклотронного радиоисточника для изолированного одиночного пятна, наблюдаемого под достаточно большим углом: одномерные распределения яркости асимметричны и имеют максимум, смещенный в сторону солнечного лимба, распределение степени поляризации образует кайму (кольцо) с максимумом, направленным к центру диска Солнца.
- Показано, что максимумы распределений радиояркости на разных волнах находятся в районе границы тень-полутень; с увеличением длины волны максимум смещается в направлении лимба. Если трактовать смещение максимума как эффект проекции, то радиоисточник над исследованными пятнами находится низко: для большего пятна в АО 11140 на высоте 3–4 тыс.км (для волны 3.5 см) и менее 5 тыс.км на волне 6.2 см, для пятна меньших размеров ≈ 2.5 тыс.км на всех волнах.
- Построена двумерная модель распределения яркостной температуры для пятна в NOAA 11140 в виде двойного набора полуколец с шириной кольца в 4'', показавшая повышенные значения яркостной температуры пятна на стороне обращенной к лимбу и максимум в центральной части пятна.
- Установлено, что измеренные размеры пятна в NOAA 11140 в диапазоне (3,5 – 13) см удовлетворительно соответствуют дипольной модели источника циклотронного излучения, но измерения на более коротких волнах ~ 2 см (РАТАН-600, NoRH) вступают с ними в резкое проти-

воречие – в области нижней короны размеры источника оказываются больше, чем это допускает дипольная модель МП.

- Для устранения этого противоречия предложено использовать комбинированную модель из модифицированных вариантов диполя и соленоида.

3. Поиск «идеальных» одиночных солнечных пятен и анализ свойств их радиоизлучения по материалам наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 (исследовано пятно в активной области NOAA 11899):

- *Впервые* приведены результаты наблюдений на РАТАН-600, с большой достоверностью подтверждающие существенное специфическое влияние угла зрения на изображения солнечных пятен при наблюдениях на микроволнах, выражающееся в появлении в изображении кольцеобразных и серповидных структур (эффект Гельфрейха-Лубышева (Г–Л)).
- Показаны преимущества наблюдения эффекта Г–Л в коротковолновом диапазоне длин волн, где из-за резкого градиента температур эффект проявляется наиболее контрастно.
- Наглядно продемонстрировано, что влияние эффекта Г–Л необходимо всегда учитывать при измерениях высоты источника циклотронного излучения, лежащего в короне над солнечным пятном.
- Показано, что *необходимым* условием правильной интерпретации радионаблюдений солнечных пятен является строгий учет временной динамики радиоизображений, возникающей за счет поворота луча зрения при вращении Солнца, в сочетании с требованием высокого частотного разрешения.
- *Впервые* по радионаблюдениям благодаря учету эффекта Г–Л выявлено отклонение МП пятна от вертикали, увеличивающееся с увеличением длины волны. Изгиб, типа магнитной петли, происходит в характерном для биполярных АО направлении.
- Продемонстрировано на одном примере, как отсутствие учета возможного изгиба МП может заметно исказить видимое распределение радиояркости по пятну и вызвать значительные артефакты при восстановлении распределения физических параметров плазмы в атмосфере над пятном.
- Отмечена необходимость проведения регулярных (ежедневных) наблюдений, что возможно только при использовании специализированных солнечных инструментов.

Научная и практическая значимость. В настоящее время в солнечной физике происходит переход от упрощенных моделей атмосферы к полномасштабному численному моделированию, и для его адекватного выполнения требуются расчеты (и соответственно наблюдения) по всей высоте атмосферы — от подфотосферных слоев до короны. Наблюдениями хуже всего перекрыта область верхней хромосферы и переходной области. Информацию в этом диапазоне температур с успехом могли бы обеспечить радионаблюдения. Также удобно, что радиоизлучение очень чувствительно к магнитному полю, измерение которого сильно затруднено в других диапазонах волн. К сожалению радионаблюдения пока не обладают достаточным угловым разрешением, что сильно ограничивает их практическое использование. Работающие и строящиеся интерферометры обладают более высоким, чем у РАТАН-600 разрешением, но каждый имеет свой определенный неустраняемый недостаток. Наш опыт работы с материалами наблюдений Солнца на РАТАН-600 свидетельствует о том, что с помощью этого инструмента можно было бы проверять вводимые в строй интерферометры, как результаты их наблюдений, так и результаты моделирования.

Из полученных нами результатов с точки зрения Физики Солнца и теории солнечной плазмы интересно, прежде всего, обнаруженное «потемнение», которое пока плохо вписывается в существующие модели атмосферы над пятном и требует как дальнейшей проверки самого явления, так и попыток построения совместной радио-оптической модели для конкретного пятна.

Для интерпретации наблюдений интересен также результат исследования эффекта Гельфрейха-Лубышева, уточняющий наши представления о корональном МП солнечных пятен и требующий при моделировании источников циклотронного излучения использования более сложных (чем дипольная) моделей МП, с учетом его искривления, особенно в тех случаях, когда пятно входит в состав биполярной АО.

Результаты, выносимые на защиту.

- *Впервые* по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 обнаружены в нескольких крупных солнечных пятнах «потемнения» на коротких (до ≈ 2.3 см) волнах, связанные с существенной перестройкой атмосферы над пятном, вызванной сильным магнитным полем пятна.
- *Впервые*, благодаря использованию крупных полноповоротных радиотелескопов РТ-32 ИПА РАН, получены во время солнечных затмений наиболее достоверные одно- и квазидвумерные распределения излучения солнечных пятен с предельным угловым разрешением $1-3''$ на волнах 3.5, 6.2

и 13.0 см, имеющие характерный для циклотронного механизма излучения вид. С большой точностью измерена высота источника микроволнового излучения над уровнем фотосферы, оказавшаяся крайне низкой (3-5 тыс. км).

- *Впервые* по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 с большой достоверностью продемонстрировано существенное влияние угла наблюдения на изображение источника циклотронного излучения над солнечным пятном правильной формы, выражающееся в появлении в изображении характерных кольцевых/подковообразных структур и их специфическом изменении в зависимости от угла зрения.
- *Впервые* по радионаблюдениям на РАТАН-600 выявлено отклонение МП пятна от вертикали, увеличивающееся с увеличением длины волны (петлеподобная искривленность линий МП), и показано его существенное влияние на результаты анализа радионаблюдений.

Апробация работы. Результаты, полученные в ходе данного исследования, докладывались на семинарах Кафедры астрофизики СПбГУ, а также на 15 научных конференциях: Всероссийская конференция «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» (САО РАН, Н.Архыз, 2006); Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010, САО РАН, пос. Нижний Архыз и ВАК-2013, ГАО РАН, Санкт-Петербург); Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК-2011) «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ИПА РАН, Санкт-Петербург, 2011); COSPAR Symposium “Cosmic magnetic fields legacy of A.B. Severny” (RI «Crimean Astrophysical Observatory», Nauchny, Crimea, 2013); CESRA 2013 Workshop «New eyes looking at solar activity: Challenges for theory and simulations» (AI ASCR, Prague, Czech Republic, 2013); Девятая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2014); Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика» (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2008, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015).

Публикации по результатам работы. Основные результаты работы по теме диссертации отражены в 17 публикациях, из которых:

7 статей в журналах, рекомендованных ВАК:

- 1*. *Топчило Н.А., Петерова Н.Г., Борисевич Т.П.* Корона над крупным одиночным пятном по наблюдениям в R и L-поляризации на микроволнах // *Астрономический журнал*. 2010. Т.87, №1. С.75–92. Translated

- in *N.A. Topchilo, N.G. Peterova, and T.P. Borisevich* The Microwave Radiation of the Corona above a Large Single Sunspot in Right- and Left-Circular Polarization // *Astronomy Reports*. 2010. V.54, N 1. P.69–85.
- 2*. *Bezrukov D., Ryabov B., Peterova N., Topchilo N.* Sharp Changes In the Ordinary Mode Microwave Emission from a Stable Sunspot: Model Analysis // *Latv.J. of Phys. and Tech.Sciences*. 2011. V.48, N 2. P.56–69.
- 3*. *Korzhavin A.N., Peterova N.G., Topchilo N.A.* Ring-Shaped Cyclotron Radiation Source on the Example of the NOAA 11140 Active Region According to High Angular Resolution Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. V.52, N 7. P.867–874.
- 4*. *Peterova N.G., Topchilo N.A., Opeikina L.V., Agalakov B.V., Borisevich T.P., Lubyshev B.I.* Anomalous Polarization Features of the Cyclotron Radiation Source in the NOAA 7123 Active Region: The Structure, Dynamics, and Reasons of Occurrence // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. V.53, N 8. P.1000–1006.
- 5*. *Ryabov B.I., Gary D.E., Peterova N.G., Shibasaki K., Topchilo N.A.* Reduced Coronal Emission Above Large Isolated Sunspots // *Solar Physics*. 2015. V.290, Issue 1. P.21–35.
- 6*. *В.М. Богод, Н.Г. Петерова, Б.И. Рябов, Н.А. Топчило* О регистрации излучения пониженной яркости в области сильного магнитного поля солнечных пятен // *Космические исследования*. 2015. Т.53, №1. С.13–23. Translated in *Bogod V.M., Peterova N.G., Ryabov B.I., Topchilo N.A.* On the Recording of an Emission with a Reduced Brightness in the Region of a Strong Sunspot Magnetic Field // *Cosmic Research*. 2015. V.53, N 1, P.10–20.
- 7*. *Петерова Н.Г., Топчило Н.А.* Эффект Гельфрейха-Лубышева по наблюдениям солнечных пятен на микроволнах // *Астрофизический бюллетень*. 2016. Т.71, №2. С.251–260. Translated in *N. G. Peterova, N. A. Topchilo* The Gelfreikh–Lubyshev effect according to microwave observations of sunspots // *Astrophysical Bulletin*. 2016. V.71, Issue 2, P.232–240.
- 4 статьи в прочих журналах:
- 8*. *Финкельштейн А.М., Топчило Н.А., Петерова Н.Г., Ахмедов Ш.Б., Борисевич Т.П., Дьяков А.А., Ильин Г.Н., Ипатов А.В., Коржавин А.Н., Рахимов И.А., Смоленцев С.Г.* Предварительные результаты наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопах РТ–32

(Светлое), РТ–32 (Зеленчукская), РТ–2,5 (Петергоф) и БПР (Пулкovo) // Труды Института Прикладной астрономии РАН. 2006. Вып.14. С.33–42.

9*. *Финкельштейн А.М., Рахимов И.А., Дьяков А.А., Коржавин А.Н., Топчило Н.А., Свешников М.Л., Петерова Н.Г.* Наблюдения солнечного затмения 04.01.2011 г. на двух радиотелескопах РТ–32 (Светлое и Зеленчукская): первые результаты // Труды Института Прикладной астрономии РАН. 2012. Вып.25. С.154–169.

10*. *Петерова Н.Г., Коржавин А.Н., Топчило Н.А.* Кольцеобразный источник циклотронного излучения в активной области NOAA 11140 по наблюдениям с высоким разрешением 1 угл. сек // Изв. Крымской Астрофиз. Obs. 2013. Т.109, №2. С.83–84.

11*. *Петерова Н.Г., Топчило Н.А.* Корональное магнитное поле в переходной области хромосфера-корона над солнечными пятнами по наблюдениям на микроволнах: возможности и проблемы исследований // Изв. Крымской Астрофиз. Obs. 2013. Т.109, №3. С.94–101.

6 статей в сборниках трудов конференций:

12*. *Агалаков Б.В., Борисевич Т.П., Опейкина Л.В., Петерова Н.Г., Топчило Н.А.* Активная область NOAA 7123 «глазами» VLA, РАТАН-600, ССРТ и БПР: расхождение результатов и его возможные причины // Труды Всероссийской ежегодной конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2010», 3–9 октября 2010 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2010, С.23–26.

13*. *Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Рябов Б.И., Безруков Д.А.* Характеристики источника циклотронного излучения над активной областью NOAA 10325 // Труды Всероссийской ежегодной конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2010», 3–9 октября 2010 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2010, С.311–314.

14*. *Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Топчило Н.А.* О кольцеобразной структуре источника циклотронного излучения над солнечным пятном по наблюдениям с разрешением 1 угл. сек. // Труды Всероссийской ежегодной конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2011», 3–7 октября 2011 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2011, С.131–134.

15*. *Петерова Н.Г., Агалаков Б.В., Борисевич Т.П., Лубышев Б.И., Опейкина Л.В., Топчило Н.А.* Динамика и структура активной области

NOAA 7123 по наблюдениям на VLA, РАТАН-600, ССРТ и БПР // Труды Всероссийской ежегодной конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2012», 24–28 сентября 2012 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2012, С.305–308.

16*. *Топчило Н.А., Петерова Н.Г.* Эффект Гельфрейха–Лубышева по наблюдениям активной области NOAA 11899 // Труды XVIII Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», 20–24 октября 2014 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2014, С.419–422.

17*. *Рахимов И.А., Дьяков А.А., Ипатов А.В., Ильин Г.Н., Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Топчило Н.А.* Наблюдения солнечного затмения 20.03.2015 на двух радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» (предварительные результаты) // Труды XIX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015», 5–9 октября 2015 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2015, С.313–316.

Личный вклад автора. Автору принадлежит приоритет в открытии по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН–600 ослабления радиоизлучения пятна в о-моду на коротких см волнах и обнаружении доказательного примера решающего влияния эффекта Гельфрейха–Лубышева на структуру изображения радиоисточника над солнечным пятном. В большинстве отмеченных статей (за исключением [2*, 5*]) автор выполнил основную долю работы по обработке и анализу наблюдений, изготовлению и оформлении иллюстративного и наблюдательного материала. Во всех указанных работах автор участвовал в постановке задачи и анализе хода ее выполнения. В написании и обсуждении текста статей вклад соавторов равнозначен.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации — 158 с., включая 69 рисунков и 7 таблиц.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, отмечена научная новизна полученных результатов, научная и практическая ценность работы. Перечислены положения, выносимые на защиту, даны сведения о апробации работы и личном вкладе автора, представлено краткое содержание диссертации.

Первая глава «Атмосфера над солнечными пятнами» содержит краткое описание текущего состояния наших знаний о структуре атмосферы

ры над солнечными пятнами, методов их исследования и особенностей механизмов излучения, приведен исторический обзор радионаблюдений солнечных пятен, имеющиеся наблюдательные возможности и перспективы изучения радиоизлучения солнечных пятен.

Вторая глава «Особенности атмосферы пятен по наблюдениям на РАТАН-600 в коротковолновой части см диапазона» посвящена результатам спектро-поляризметрических исследований крупных солнечных пятен по наблюдениям на РАТАН-600. В качестве дополнительного материала привлекались данные, полученные на радиогелиографах NoRH и ССРТ, а также на других инструментах.

В разделе 2.1 приведен анализ наблюдений крупного пятна в АО NOAA 10105. На сканах РАТАН-600 по стандартным процедурам обработки было выделено излучение АО и разделено на крупномасштабное *гало* и мелкомасштабный локальный источник, ассоциирующийся с крупным одиночным правильным пятном. Для обоих источников измерены потоки, размеры, яркостные температуры для волн в диапазоне 1.83–6.52 см. Измерения проводились отдельно для правой и левой поляризаций излучения. В поляризации, соответствующей обыкновенной моде был обнаружен «провал» яркости излучения ниже фонового уровня (рис. 1).

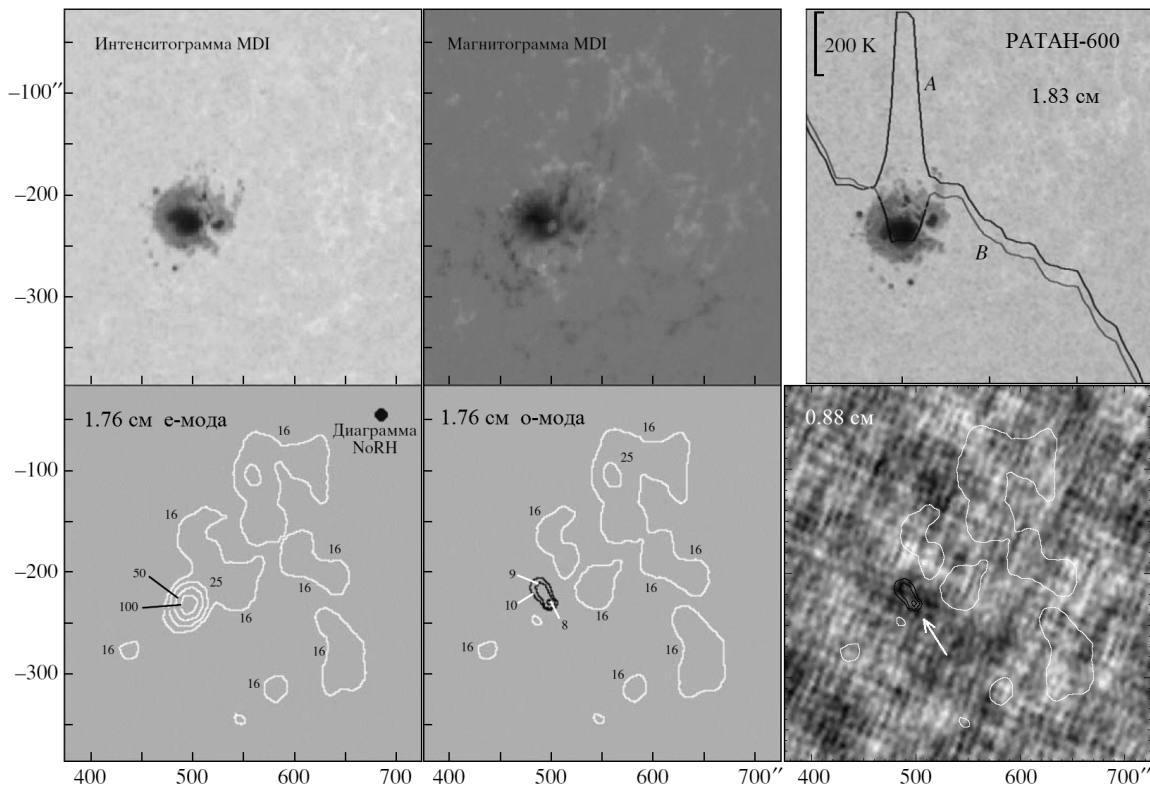


Рис. 1: Наблюдения АО 10105 за 16.09.2002 г.. Верхний ряд: карты, полученные на SOHO/MDI, и скан, полученный на РАТАН-600 на волне 1.83 см; нижний ряд: карты NoRH на волне 1.76 см (*e*- и *o*-мода) и 0.88 см (интенсивность с наложенными изофотами *o*-моды на волне 1.76 см). Стрелкой указано положение потемнения 0.88 см.

Анализ карт, полученных на радиогелиографе NoRH также показывает понижение яркости на волне 1.76 см (в *o*-модe) и на 0.88 см (в интенсивности).

Используя данные о магнитном поле, полученные из оптических наблюдений, построены системы гироуровней МП пятна, по которым зависимость яркостной температуры и размера источника от длины волны переводится в зависимость от высоты. Предположение о том, что *o*-мода генерируется на 2-м гироуровне, а *e*-мода на 3-м приводит к тому, что на коротких волнах 2-й гироуровень оказывается горячее 3-го, а размер его больше. Поскольку причин для этого не обнаружено, сделан вывод, что часть излучения *o*-моды должна идти с 3-го гироуровня.

В *разделе 2.2* приведен аналогичный анализ наблюдений крупного пятна в АО NOAA 10325, которое также показывает потемнение на коротких волнах, но в отличие от пятна в АО 10105 только в пределах ± 3 дня от момента прохождения пятном центрального меридиана (ЦМ). В отличие от пятна в АО 10105, показывающего постоянный рост размера источника с длиной волны, у этого пятна на длинных волнах размер остается постоянным. Для объяснения этого факта Б.Рябовым [2*, 13*] была рассчитана численная осесимметричная модель с дипольным МП и неоднородным распределением температуры и плотности по радиусу, характеризующаяся пониженной плотностью и температурой.

В *разделе 2.3* приведены дополнительные примеры наблюдений «потемнений» в других АО (§ 2.3.1), и некоторые соображения по поводу причин образования «потемнений» (§ 2.3.2) и образования реверсной поляризации, не связанной с QT-областями (§ 2.3.3).

В § 2.3.1 кратко рассмотрены наши наблюдения пятна в АО NOAA 10289, для которого потемнение наблюдалось вплоть до волны 2.27 см. Проанализированы результаты старых работ (1991–1992 г.) других авторов на VLA (2.0 см) и NoRH (1.76 см) и свежие наблюдения на 3.5 мм, 2.6 мм и 8.8 мм японских радиоастрономов, находящиеся в согласии с нашими результатами.

В § 2.3.2 описаны наши попытки связать появление «потемнений» с особым характером МП – наличием в пятне участков с «открытыми» силовыми линиями и истечением плазмы вдоль них в межпланетное пространство. Около 50% рассмотренных пятен такую связь обнаруживают, но для уверенного заключения требуется методика экстраполяции МП в корону более точная, чем использованная нами PFSS экстраполяция.

В § 2.3.3 рассмотрена статья Вурлидаса и др. 1997, посвященная анализу обнаруженного VLA преобладания в течение 3-х дней *o*-моды излучения на 6.4 см над пятном в АО NOAA 7123, которое не связано с пе-

ресечением излучением QТ-области. Объяснение этого явления строится на предположении о существовании отрицательного высотного градиента температуры, когда 2-й гироуровень оказывается горячее 3-го. У автора это достигается использованием гидростатической модели МП Low 1980, с уменьшенной расходимостью и множеством низких горячих разнотемпературных петель. Мы предложили другой вариант интерпретации – втекание сверху потока холодной плазмы от расположенного рядом с пятном волокна, видимого в H_{α} . Один из концов волокна проникал в пятно, а знак доплеровского сдвига указывал на течение вещества в направлении к пятну.

В *разделе 2.4* приводятся выводы, полученные во *второй главе*.

Результаты *главы 2* опубликованы в [1*,2*,4*-6*,12*,13*,15*].

Третья глава «Наблюдения солнечных пятен на РТ-32 ИПА РАН во время солнечных затмений» посвящена анализу распределений радиояркости циклотронных источников над солнечными пятнами, полученных в результате обработки наблюдений, выполненных на двух радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН (обс. «Светлое» и «Зеленчукская») на волнах 3.5, 6.2 и 13.0 см во время солнечных затмений 2006, 2011 и 2015 г..

В *разделе 3.1* описаны астрономические обстоятельства затмения 2011 г., методика наблюдений на радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН и их первичной обработки, приведены оригинальные затменные кривые для всех, наблюдавшихся объектов — АО NOAA 11140, NOAA 11141, NOAA 11142, и результаты их предварительной обработки. Используя различные степени сглаживания затменных кривых показано, что для одиночного пятна в АО NOAA 11140, самого крупного из всех имевшихся в день затмения, достигнуто одномерное угловое разрешение в $1-3''$, близкое к предельному значению, ограниченному дифракцией.

Раздел 3.2 посвящен детальному анализу пятна в АО NOAA 11140, которое визуально похоже на идеальное пятно и, поэтому, наилучшим образом подходит для сопоставления результатов наблюдений с результатами их моделирования.

В § 3.2.1 приведены основные наблюдательные характеристики АО. Исследуемое пятно имело правильную, круглую форму и средние размеры тени $\approx (15 - 20)''$.

В § 3.2.2 представлены результаты обработки радионаблюдений пятна. По данным измерений на РАТАН-600 спектр потока пятенной компоненты имел обычный для источников циклотронного излучения характер с максимумом в 3 с.е.п. в районе 4.5 – 8 см. Близкие результаты получены и из наблюдений на РТ-32. Благодаря высокому угловому разрешению затменных наблюдений были с высокой точностью измерены размеры источников и получены яркостные температуры.

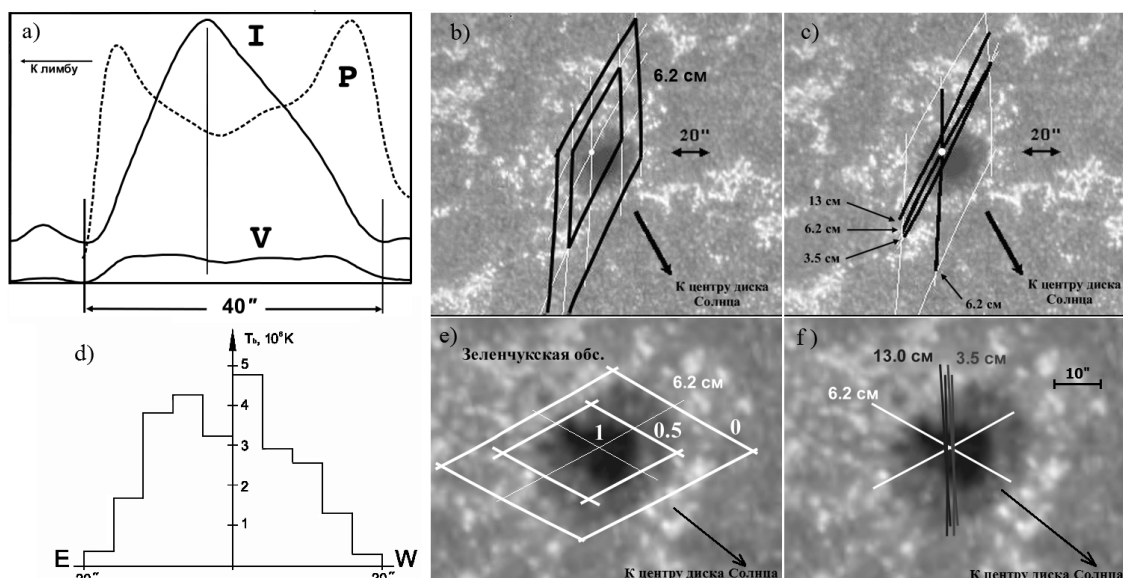


Рис. 2: Результаты координатных измерений пятенного источника, полученные на затмениях 2011 г. (панели (a)–(d)) и 2015 г. (панели (e), (f), пояснения в § 3.3.3). a) Одномерные распределения интенсивности (I), круговой поляризации (V) и степени поляризации (P) на 6.2 см. d) Квазидвумерное распределение яркостной температуры, рассчитанное по одномерной записи, приведенной на панели (a). b,e) Ромбиками отмечен нулевой уровень интенсивности на волне 6.2 см и уровень 0.5 от максимума, положение которого на картах показано светлой точкой. c,f) Прямые линии отмечают положения максимумов интенсивности источника на одномерном распределении при покрытии/открытии источника на разных волнах.

Особенно интересными оказались результаты координатных измерений радиоисточника (см. рис. 2). Вид асимметрии одномерной интенсивности излучения (I) пятенного источника (рис. 2a) соответствует классической модели циклотронного источника – более пологий склон направлен в сторону центра Солнца, более крутой к лимбу. Наблюдаемое на разных волнах смещение максимума источника относительно геометрического центра пятна невелико (рис. 2b-c) и связано не с высотой источника, а со спецификой циклотронного излучения.

В § 3.2.3 представлено квазидвумерное распределение радиояркости по пятну, полученное А. Н. Коржавиным [10*, 14*] с помощью классического метода восстановления двумерных изображений по одномерным сечениям *в предположении круговой симметрии* (в виде двух наборов концентрических полуколец). На волне 6.2 см восстановленное распределение интенсивности (рис. 2d) имеет куполообразный асимметричный вид с небольшим провалом в центре источника. Поляризация в центре пятна небольшая с резким увеличением к краю источника, что хорошо согласуется с моделью циклотронного источника.

В § 3.2.4 представлена построенная для пятна в NOAA 11140 стандартная дипольная модель МП в виде 2-го (*o*-мода) и 3-го (*e*-мода) гиро-

уровней. Измеренные на РТ-32 во время затмения размеры радиоисточника согласуются с моделью при использовании значений МП в ≈ 3.3 кГс, полученных на станциях сети GONG. Однако, на более коротких волнах по измерениям РАТАН-600 размеры источника оказываются больше модельных.

Для устранения расхождений в § 3.2.5 предложено использовать модель МП в виде комбинации погруженных под фотосферу диполя и соленоида конечных размеров. Рассчитаны зависимости высоты МП от их размеров. Добавка соленоида приводит к более медленному уменьшению МП с высотой и изменению формы гироуровней – они становятся более плоскими на небольших высотах. Суммарное поле становится похожим на карты модуля МП, получаемым по данным спутника HINODE. При этом поле над фотосферой остается потенциальным.

В § 3.2.6 представлены основные результаты *раздела 3.2*.

В *разделе 3.3* приведено описание наблюдения солнечного затмения 2015 г.. Обстоятельства затмения 2015 г. и 2011 г. оказались очень похожими. На всем Солнце имелось только одно пятно, представлявшее интерес. Оно располагалось примерно в том же месте, что и на затмении 2011 г., но размер его был примерно в 2 раза меньше, а спектральная плотность потока в 3 раза меньше. В результате эффективное угловое разрешение затменных наблюдений в 2015 г. оказалось ниже в 2-3 раза. Описание затмения выполнено по схеме, использованной ранее в *разделе 3.2*, за исключением построения модели МП. Основные результаты оказались близки к результатам полученным в 2011 г.: более пологий склон записи источника направлен в сторону центра Солнца, более крутой к лимбу (рис. 2e); положение максимума источника смещено в сторону лимба и с длиной волны изменяется мало (рис. 2f) (в 2015 г. максимумы практически совпадают); наблюдается двугорбость в степени поляризации. Таким образом, характер распределения яркости не зависел от размеров пятна, и, возможно, он является фундаментальным свойством одиночного правильного пятна, продемонстрированным в работах Е. Я. Злотник в 1968 г..

В *разделе 3.4* приведены обобщенные свойства циклотронных источников над солнечными пятнами выявленные по результатам обработки всех наблюдений солнечных затмений на радиотелескопах РТ-32.

Результаты *главы 3* опубликованы в [3*,8*-11*,14*,17*].

Четвертая глава «О роли эффекта Гельфрейха–Лубышева в исследовании солнечных пятен» посвящена рассмотрению роли геометрических эффектов, характерных для источников циклотронного излучения, которые проявляются в образовании тонкой структуры изображения, в виде колец, серпов и похожих на них структур. Причиной образования та-

ких структур также могут являться особенности распределения различных физических параметров плазмы в атмосфере пятна. В том случае, когда структуры образуются исключительно за счет сочетания геометрии МП и угла зрения, под которым наблюдается источник, будем называть это проявлением эффекта Гельфрейха–Лубышева.

В разделе 4.1 представлены результаты наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 тонкой структуры изображения источника циклотронного микроволнового излучения, располагающегося над главным (головным) пятном АО NOAA 11899. Группа и пятно были специально отобраны по критерию стабильности, простоты структуры и большого размера пятна.

В § 4.1.1 приведено описание АО NOAA 11899 и характеристик ее головного пятна. За время наблюдений с 15 по 22 ноября 2013 г. площадь пятна и его МП почти не изменялись ($S_p \approx 745$ м.д.п., $B \approx 3700$ Гс). Что очень важно пятно прошло почти через центр диска Солнца, где геометрические эффекты максимальны (мин. расстояние до центра было $\approx 5^\circ$).

В § 4.1.2 рассмотрена динамика потока излучения и вида радиоизображений, полученных на РАТАН-600 в период прохождения центрального меридиана. И если поток меняется достаточно плавно, то структура изображения (сканов) претерпевает кардинальную перестройку (см. рис. 3).

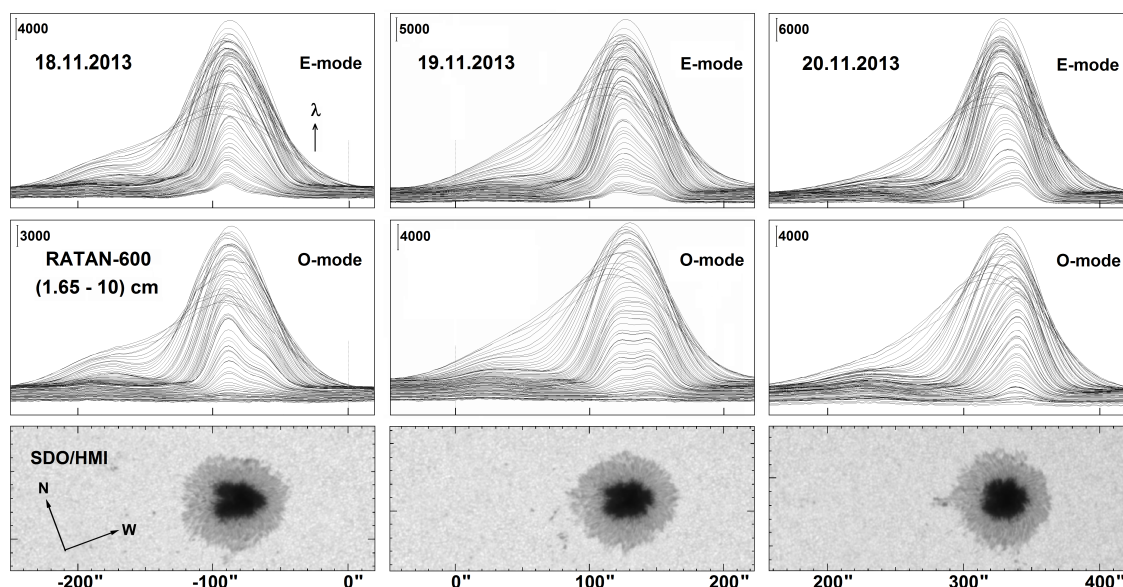


Рис. 3: Сканы АО 11899 в антенных температурах, полученные на РАТАН-600 в *e*- и *o*-модах в диапазоне 1.65–10 см за 3 дня (18-19-20).11.2013 г. в период прохождения центрального меридиана Солнца. Стрелкой со значком λ указано направление увеличения длины волны сканов, а тонкими вертикальными линиями (абсцисса = 0) отмечен момент прохождения диаграммой направленности телескопа через центр диска Солнца.

На рисунке видно, что в целом до пересечения ЦМ (18.11.2013) сканы были асимметричными с максимумом слева, в направлении ближайшего лимба (подобное мы видели и в наших наблюдениях затмений), при пере-

сечении ЦМ сканы становились двугорбыми, а после – асимметричными с максимумом справа, т.е. также в направлении к ближайшего лимбу.

Такие особенности изменений изображения в общих чертах согласуются с расчетами, выполненными Гельфрейхом и Лубышевым в рамках самой простой модели атмосферы над солнечным пятном. Но отмечаются также существенные отличия, а именно, обращение вида записи пятна происходит не строго в момент пересечения ЦМ, а с некоторой задержкой, величина которой увеличивается с длиной волны, что может свидетельствовать об изогнутом характере магнитных силовых линий (типа петли). Изгиб МП направлен в сторону хвостовой части активной области, которая имеет знак поля противоположный знаку МП пятна. Характерно, что величина задержки у e -моды больше, чем у o -моды, что согласуется с представлением, что e -мода излучается из более высоких слоев.

В § 4.1.3 описана аналогичная динамика, полученная для этого же пятна по наблюдениям радиогелиографа Nobeyama, когда максимальная яркость источника сначала уменьшается при приближении к ЦМ, а затем восстанавливается до начального значения, но с некоторой временной задержкой, составлявшей 0.26^d для o -моды и 0.98^d для e -моды.

В § 4.1.4 приведен ряд примеров в которых, вероятно, имело место проявление эффекта Г-Л, но отсутствие полных данных о динамике процесса не позволяет утверждать это со 100% уверенностью. Еще на одном из примеров показано, как неучет временной задержки при пересечении центрального меридиана и изгиба МП может приводить к неверной трактовке наблюдений - попытке компенсации влияния реальной структуры МП сложным высотным распределением температуры и плотности над солнечным пятном. Разделить влияние МП, температуры и плотности возможно только при наблюдении под разными углами, что требует проведения ежедневных наблюдений, возможных только на специализированных солнечных инструментах.

В разделе 4.2 представлены основные результаты, полученные в главе 4.

Результаты главы 4 опубликованы в [7*,16*].

В **Заключении** сформулированы основные результаты выполненной работы (см. выше в пункте «Научная новизна работы»).

Продолжение и развитие работы возможно в трех направлениях: (1) наращивание статистики наблюдений обнаруженных или отмеченных эффектов; (2) построение компьютерных моделей с учетом обнаруженных эффектов; (3) объединение возможностей РАТАНа с возможностями других крупных инструментов.