

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Специальная астрофизическая обсерватория  
Российской академии наук  
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524  
№ АААА-А18-118012490313-1



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
по проекту «ФИЗИКА МАГНИТОСФЕР АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В  
ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ХРОМОСФЕРА-КОРОНА И НИЖНЕЙ КОРОНЫ  
СОЛНЦА ПО МИКРОВОЛНОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ»



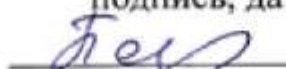





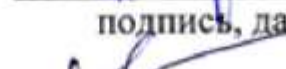

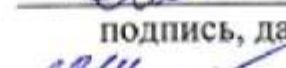
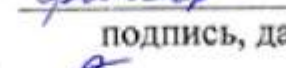

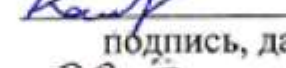
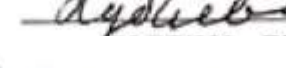
программы ПРАН П-7 «Экспериментальные и теоретические исследования  
объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные  
процессы в астрофизике» подпрограмма 1. «Экспериментальные и теоретические  
исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд»

(Заключительный)

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН 26 декабря 2017 года  
(протокол №359).

Нижний Архыз  
2017

## ИСПОЛНИТЕЛИ РАБОТ

Руководитель темы зав. СПб Ф САО РАН д. ф.-м. н.	<u></u> подпись, дата	В. М. Богод
Рук. группы Снс, к.ф.-м.н.	<u></u> подпись, дата	Т.И.Кальтман
Снс, к.ф.-м.н.	<u></u> подпись, дата	Н.Г.Петерова
Снс, д.ф.-м.н.	<u></u> подпись, дата	О.А.Голубчина
М.н.с.	<u></u> подпись, дата	Е.А. Курочкин
Рук. группы Снс, к.ф.-м.н.	<u></u> подпись, дата	В.Б.Хайкин
Снс, к.ф.-м.н.	<u></u> подпись, дата	А.М.Рипак
Ведущий инженер	<u></u> подпись, дата	А.А.Стороженко
Ведущий инженер	<u></u> подпись, дата	М.К.Лебедев
Ст. инженер	<u></u> подпись, дата	А.В. Шендрик
Ст.инженер	<u></u> подпись, дата	С.А.Шлензин
Рук. группы	<u></u> подпись, дата	А.А.Перваков
Инженер-программист	<u></u> подпись, дата	Т.Н.Казанина
Инженер-программист	<u></u> подпись, дата	Н.В.Хубиева
Нормоконтроллер	<u></u> подпись, дата	Ш.А.Узденова

## РЕФЕРАТ

Отчет 12 с., 3 рис., 1 прил.

Цель работ – проведение фундаментальных и прикладных исследований, в области астрономии и смежных с ней науках по направлению: В результате выполнения работ получено следующее:

В 2017г. проведено исследование ряда активных областей с четко выраженными головными пятнами. По результатам многоволновых поляризационных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 обнаружено циклотронное излучение 4-й гармоники гирочастоты, которое подтверждено детальными модельными расчетами и дана физическая интерпретация обнаруженному явлению. Наблюдательное проявление физического эффекта, который следует из теории циклотронного излучения четко зарегистрировано во многих случаях благодаря наличию широкодиапазонных спектральных (1%) и поляризационных наблюдений с умеренным пространственным разрешением (15 сек дуги) по одной координате на радиотелескопе с большой эффективной площадью РАТАН-600. Значимость полученного результата определяется важностью измерения распределения корональных магнитных полей в тех частях солнечной атмосферы, где традиционные оптические методы на эффектах Зеемана и Ханле малоэффективны из-за высоких корональных температур.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АО – активная область

AR NOAA- номер активной области в каталоге NOAA

МГД- магнито-гидродинамические волны

РАТАН-600 –радиотелескоп в России

МВ -микровсплески

DPR - двойной плазменный резонанс

NS - Шумовые бури

NLS – источник над нейтральной линией магнитного поля  
(Neutral Line Source),

SDO/HMI – космический аппарат SDO с прибором HMI

о-мода – обыкновенное циклотронное излучение

е-мода – необыкновенное циклотронное излучение

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	12
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	12

## ВВЕДЕНИЕ.

Вопросы, связанные с изучением магнитосферы активной области на Солнце близки по аналогии с магнитосферой Земли, поскольку охватывают как единые процессы в них происходящие (процессы передачи, накопления и высвобождения энергии), так и в определяющие их различия (масштабы распространения, величины магнитных полей, температур и плотностей плазмы). Магнитные поля на уровне корональных температур могут измеряться радиоастрономическими методами на крупных инструментах. Такие наблюдения на РАТАН-600 ведутся в микроволновом диапазоне с хорошим спектральным перекрытием. Это позволяет всесторонне изучать корональную магнитоактивную плазму в АО. В сантиметровом диапазоне обнаружены тонкие особенности в спектрах циклотронного излучения показывают такие: как выход в область корональных температур 4, 3 и 2 гармоник гирочастоты, опускание из короны в область хромосферных температур 3 и 2 гармоник гирочастоты, изломы в широкодиапазонном радиочастотном спектре, используемые как маркеры для оценок коронального магнитного поля в активной области (АО). В результате работы показано, что при реализации существующих возможностей повышения временного разрешения можно достичь значительных результатов в исследовании магнитосфер активных областей, поскольку станут доступны многоволновые наблюдения на РАТАН-600 для изучения динамических явлений в магнитосфере активной области.

## 1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 1.1 Обнаружение 4-й гармоники в циклотронном излучении над пятном.

Кратко. Впервые получены наблюдательные проявления циклотронного излучения на 4-й гармонике гирочастоты. Результаты наблюдений подтверждаются модельными расчетами. Значимость полученного результата определяется важностью измерения корональных магнитных полей с использованием радиоастрономических спектрально-поляризационных измерений.

Радиоастрономические измерения циклотронного излучения основаны на том факте, что радиоизлучение, генерированное в присутствии магнитного поля, циркулярно поляризовано, а знак и степень поляризации зависит от типа механизма излучения, температуры и плотности плазмы, где излучение возникло и распространялось. В случае, когда механизм эмиссии определен, поляризационные измерения радиоизлучения обеспечивают возможность определения напряженности магнитного поля.

Подробно. По результатам многоволновых поляризационных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 обнаружено циклотронное излучение 4-й гармоники гирочастоты, которое подтверждено детальными модельными расчетами и дана физическая интерпретация обнаруженному явлению.

Известно, что излучение радиоисточников над пятнами определено, в основном, тепловым циклотронным механизмом на первых 2-5 гармониках гирочастоты и тепловым free-free излучением [Железняков и Злотник, 1980]. Суть методов основана на том факте, что радиоизлучение, генерированное в присутствии магнитного поля, циркулярно поляризовано, а знак и степень поляризации зависит от типа механизма излучения, температуры и плотности плазмы, где излучение возникло и распространялось. В случае, когда механизм эмиссии определен, поляризационные измерения радиоизлучения обеспечивают возможность определения напряженности магнитного поля.

В микроволновом диапазоне для корректных измерений спектральных характеристик циклотронного излучения используются многоволновые спектральные (1%) и поляризационные наблюдения с умеренным пространственным разрешением (15 сек дуги) по одной координате на радиотелескопе с большой эффективной площадью РАТАН-600. В регулярных наблюдениях мы получаем подробные спектры излучения для обыкновенной и необыкновенной моды для 2-й и 3-й гармоник гирочастоты ввиду их значительной оптической толщи. Однако наши модельные расчеты и наблюдения показывают, что и 4-й гироуровень также достигает уровней

корональных температур, но раньше, чем 2-й и 3-й слои. Уже при небольших угловых смещениях пятна от центрального меридиана. создаются условия для оптически плотного излучения 4-й гармоники в отсутствии мощных 3-й и 2-й гармоник. На рис.1 приведены спектры обыкновенного (о-моды) и необыкновенного излучения (е-моды) для активной области NOAA 11312.

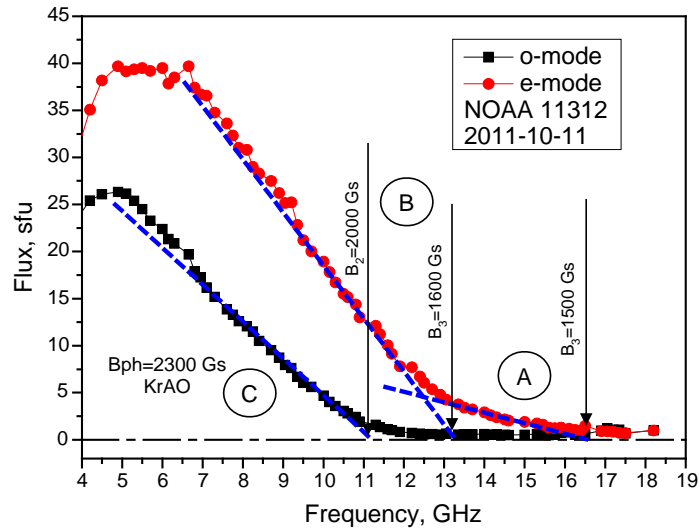


Рис.1.Спектры обыкновенного (о-моды) и необыкновенного излучения (е-моды) для активной области NOAA 11312.Здесь А-область выхода в корону 4-й гирогармоники, В- область резкого увеличения яркости при выходе 3-й гирогармоники и С- область выхода в корону 2-й гирогармоники.

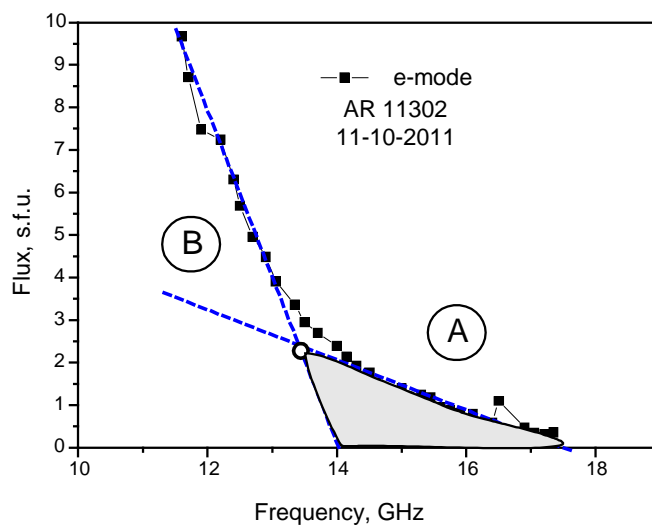


Рис.2 Демонстрация участка спектра потока излучения в е-моде при проникновении 4-й гирогармоники в область корональных температур. А- область спектра излучения 4-й гармоники гирочастоты., В- область спектра излучения 3-й гармоники гирочастоты.

На рис.1 приведены значения коронального магнитного поля измеренного для 4-й гирогармоники равное (1500 Гс), 3-й (1600 Гс) и 2-й (2000 Гс) последовательно от высоких частот к низким. Они рассчитаны в соответствии с формулами циклотронного излучения: для 2-й гармоники  $B_{2\omega_H} = 180 \cdot f [GHz]$ , для 3-й гармоники  $B_{3\omega_H} = 120 \cdot f [GHz]$  и для 4-й  $B_{4\omega_H} = 90 \cdot f [GHz]$ .

На рис.2. представлена в крупном масштабе часть микроволнового спектра в е-моде соответствующей 4-й гирогармонике.

На рис.3 приведены результаты моделирования, демонстрирующие преобладание излучения необыкновенной моды излучения 4-й гирогармоники на высоких частота, где излучение мощных излучений на 2-й и 3-й гирогармоник отсутствует.

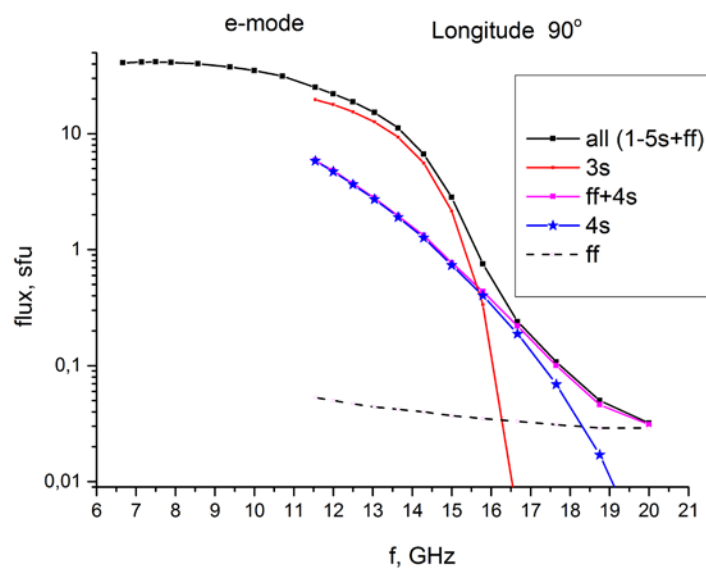


Рис.3. Результаты моделирования излучения интегрированием уравнения переноса вдоль луча зрения от корональных высот до фотосферы через 1-5 гирорезонансные слои пятенного источника. Показаны спектры для теплового free-free излучения и циклотронного излучения всех пяти гармоник гирочастоты. На высокочастотном краю видно избыточное излучение 4-й гармоники.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены наблюдательные проявления циклотронного излучения на 4-й гармонике гирочастоты. Результаты наблюдений подтверждаются модельными расчетами. Значимость полученного результата определяется важностью измерения распределения корональных магнитных полей по радиоастрономическим спектрально-поляризационным измерениям.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

#### ИНОСТРАННЫЕ РЕФЕРИРУЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ЖУРНАЛЫ

1. V. M. Bogod, T. I. Kal'tman, N. G. Peterova, and L. V. Yasnov: Study of the Magnetospheres of Active Regions on the Sun by Radio Astronomy Techniques Cosmic Research, 2017, Vol. 55, No. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1134/S0010952517010026.

#### РОССИЙСКИЕ РЕФЕРИРУЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ЖУРНАЛЫ

1. Yasnov, L. V.; Bogod, V. M.; Gofman, A. A.; Stupishina, O. M.: Spectrum and physical conditions in microflare generation regions at decimeter-wave frequencies, Astrophysical Bulletin, 2017, Volume 72, Issue 1, pp.58-66, DOI: 10.1134/S1990341317030075.

#### МАТЕРИАЛЫ РОССИЙСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ

1. Кальтман Т. И., Коржавин А. Н. Долготное изменение характеристик микроволнового излучения источников // Солнечная и солнечно-земная физика – 2017: Труды XXI ежегодной всероссийской конференции по физике Солнца, 9-13 октября 2017, Санкт-Петербург.- С. 169-172

#### ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИЙ

1. Богод В. М., Кальтман Т.И., Стороженко А.А., Ступишин А.А. Наблюдательные проявления циклотронного излучения и моделирование атмосферы активных областей по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 // Астрономия: познание без границ: Сб. тезисов ВАК-2017, 17-22 сентября 2017 г., г. Ялта, Крым, Россия, с. 98;