

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
(САО РАН)

УДК 524,7; 524.8; 520; 52
Рег. № НИОКТР АААА-А18-118012490315-5
Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН,

В. В. Власюк

«29» декабря 2018 год



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

I.3 ПРОБЛЕМА САМООРГАНИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ СТРУКТУР ОТ НАНО-ВСПЫШЕК
ДО МОЦНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ ШИРОКОДИАПАЗОННОЙ
РАДИОАСТРОНОМИИ
(промежуточный)

Программа Президиума РАН №28 "Космос: исследования фундаментальных процессов и их
взаимосвязей"

Подпрограмма I Солнечная и другие планетные системы

Руководитель НИР,
Ведущий научн. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


подпись, дата

/Богод В.М./

Нижний Архыз 2018

ИСПОЛНИТЕЛИ РАБОТ

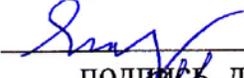
Руководитель темы
зав. СПб Ф САО РАН
д. ф.-м. н.


подпись, дата

В. М. Богод

Исполнители темы:

Зав.лаб. проф. доктор.
д.ф.-м.н.


подпись, дата

Л.В.Яснов

Ведущий научный
сотрудник д.ф.-м.н.


подпись, дата

В.М.Накаряков

Рук.группы
Снс, к.ф.-м.н.


подпись, дата

Т.И.Кальтман

Снс, к.ф.-м.н.


подпись, дата

Н.Г.Петерова

Снс, д.ф.-м.н.


подпись, дата

О.А.Голубчина

М.н.с.


подпись, дата

Е.А. Курочкин

Рук.группы
Снс, к.ф.-м.н.


подпись, дата

В.Б.Хайкин

Снс, к.ф.-м.н.


подпись, дата

А.М.Рипак

Ведущий инженер


подпись, дата

А.А.Стороженко

Ведущий инженер


подпись, дата

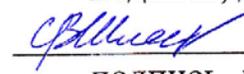
М.К.Лебедев

Ст. инженер


подпись, дата

А.В. Шендрик

Ст.инженер


подпись, дата

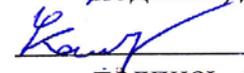
С.А.Шлензин

Рук.группы


подпись, дата

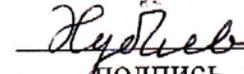
А.А.Перваков

Инженер-программист


подпись, дата

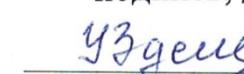
Т.Н.Казанина

Инженер-программист


подпись, дата

Н.В.Хубиева

Нормоконтроллер


подпись, дата

Узденова Ш.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 13 с., 3 рис., 1 прил.

Цель работ – проведение фундаментальных и прикладных исследований, в области астрономии и смежных с ней науках. Работы в 2018г. выполнялись по астрофизическим, аппаратурным и методическим направлениям темы.

Проект посвящен изучению поведения корональной плазмы в широком диапазоне излучения от слабоконтрастных структур на предельно возможном уровне регистрации, условий генерации микровсплесков и диагностики предвспышечных условий мощных событий. При этом рассматривается: природа формирования пред-вспышечных условий в активной области, источники первичного разогрева, процесс вспышки в широком диапазоне высот и пост-вспышечная организация. В проекте используются опыт, полученный в предыдущих исследованиях по изучению высотной структуры магнитных полей над пятнами. Наблюдения, выполняемые на крупном инструменте РАТАН-600 с подробным спектрально-поляризационным анализом, указывают на разнообразие физических условий в плазме активной области при генерации мощных вспышек. Структура циклотронного излучения над пятнами по наблюдениям на РАТАН-600 демонстрирует новые эффекты связанные с коротковолновым уярчением 3-й гармоники и, наоборот, с сильным охлаждением 2-й гармоники гирочастоты. Все эти вопросы актуальны и требуют детального исследования.

В изучении структуры атмосферы в области солнечного пятна были получены следующие новые результаты.

А) По данным 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.

Б) Новые сведения о структуре солнечной атмосферы над пятном получены в результате сопоставления микроволновых данных на РАТАН-600 и данных в субмиллиметровом диапазоне на радиотелескопе ALMA.

В) Получены новые данные по особенностям вспышечного излучения с использованием спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600. Обнаружены и подробно изучены короткопериодические КПП во вспышке в NOAA 12470. Определены механизмы вспышечного энерговыделения и дана интерпретация события.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АО – активная область

AR NOAA- номер активной области в каталоге NOAA

ALMA – новый радиотелескоп миллиметрового диапазона в Чили,

КПП- квазипериодические пульсации радиоизлучения,

РАТАН-600 –радиотелескоп в России

МВ –микровсплески

МК- миллионы градусов в шкале Кельвина

2s,3s,4s,5s –гармоники гирочастоты

ff- свободно-свободное излучение

EUV – излучение в крайне ультрафиолете

RHESSY – космический аппарат

SDO/AIA – космический аппарат SDO с прибором AIA

о-мода – обыкновенное циклотронное излучение

е-мода – необыкновенное циклотронное излучение

ГСЗ- искусственный спутник Земли

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	12
ПРИЛОЖЕНИЕ А	13
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	13

ВВЕДЕНИЕ

Изучение магнитосферы активной области на Солнце по аналогии с магнитосферой Земли вписывается, с одной стороны, в единые процессы в них происходящие (процессы передачи, накопления и высвобождения энергии), так и, с другой стороны, в определение их различий (масштабы распространения, величины магнитных полей, температур и плотностей плазмы). Данная работа выполняется в рамках направления для изучения корональной магнитоактивной плазмы на всех стадиях развития активной области.

Проведены следующие исследования:

- (а) Разработан метод диагностики параметров солнечной атмосферы, основанный на реконструкции фотосферного магнитного поля, модельных расчетах радиоизлучения и их сопоставлений с наблюдаемыми спектрами излучения АО.
- (б) В сантиметровом диапазоне исследованы тонкие особенности в спектрах циклотронного излучения показывают такие: как выход в область корональных температур 4, 3 и 2 гармоник гирочастоты, используемые как маркеры для оценок коронального магнитного поля в активной области (АО).
- (в) Получены новые данные по особенностям вспышечного излучения с использованием спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600. Обнаружены и подробно изучены короткопериодические КПП во вспышке в NOAA 12470, определены механизмы вспышечного энерговыделения и дана интерпретация события.

Рассмотрены возможности применения механизмов формирования пред-вспышечных условий в активной области для прикладного применения с целью прогнозирования вспышечной активности на большом статистическом материале.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Моделирование циклотронного излучения в атмосфере активной области и анализ излучения 4-й гармоники гирочастоты

На основе наблюдаемого радиочастотного спектра в диапазоне от 3 до 18 ГГц с помощью радиотелескопа РАТАН-600 были получены модели верхней переходной области солнечных пятен. Мы разработали диагностический метод, основанный на итерационной коррекции профиля температура-высота в переходной области и нижней короне, и применили его к трем выбранным активным областям с однополярными источниками гирорезонанса. Хорошее согласие достигается между наблюдаемыми и моделируемыми микроволновыми спектрами с использованием одномерных, не зависящих от времени моделей в гидростатическом равновесии, характеризующемся заданной температурой в зависимости от высоты. Установлено, что над солнечными пятнами верхняя высота переходной области составляет 2-2,3 мм, а температура нижней короны - 1,5-2,5 МК. Спектральные поляризационные наблюдения радиоисточников над солнечными пятнами ведутся на радиотелескопе РАТАН-600 регулярно. При детальном анализе спектров обнаруживаются новые эффекты. Подробно исследуется проявление радиоизлучения 4-й гармоники гирочастоты в микроволновых спектрах, получаемых с 1% частотным разрешением в диапазоне 3–18 ГГц (рисунок 1). Регистрация необыкновенной моды в коротковолновой части спектра сопоставляется с модельными расчетами излучения 2–5 гармоник гирочастоты на фоне теплового тормозного излучения флоккул, окружающих пятенную структуру активной области.

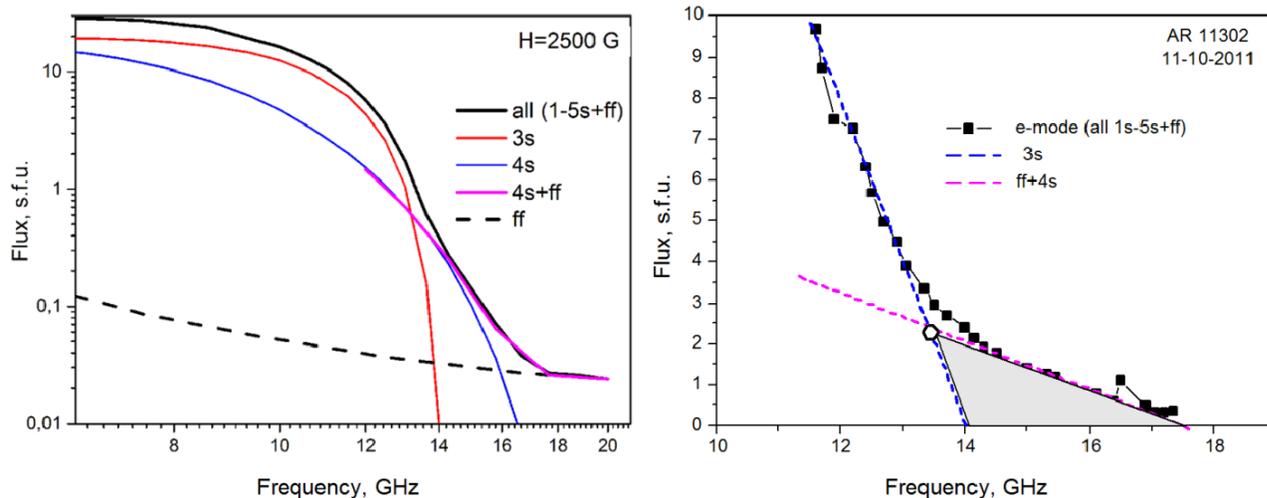


Рисунок 1 – Слева: модельный спектр излучения, разными цветами показан вклад разных гармоник и теплового тормозного излучения. Справа: сопоставление реального спектра потока излучения необыкновенной моды для активной области NOAA 11302 в соответствии с формой модельного спектра

Анализируется уярчение необыкновенной моды в коротковолновой части спектра и изломы в спектрах интенсивности излучения. Проводится интерпретация наблюдательного материала РАТАН-600 по диагностированию излучения 4-й гармоники гирочастоты.

2.2. Структура атмосферы в активной области над пятном по данным уникального инструмента ALMA в субмиллиметровом диапазоне и микроволновых наблюдений на РАТАН-600

Знания о высотном распределении температуры и плотности в атмосфере пятна крайне важны для понимания процесса переноса энергии от солнечной фотосферы вверх в корону в условиях наличия сильных магнитных полей. Изучение влияния магнитных полей на перенос энергии является задачей не только солнечной физики, но и всей физики звезд, в частности задача актуальна для активных карликов, для которых характерно наличие масштабных магнитных полей, сравнимых с полями солнечных пятен.

Пятна представляют собой самые выразительные образования на однородных оптических изображениях Солнца. Магнитные поля пятен препятствуют конвективному переносу энергии из-под фотосферы, что делает пятна темными, с температурой до 2000 К ниже, чем в окружающей спокойной фотосфере. Центральная часть пятна (тьнь пятна), в которой магнитное поле почти строго вертикально, является наиболее темной (холодной). Окружающие тень тонкоструктурные образования с почти горизонтальными магнитными

полями (полутень пятна) могут иметь разную яркость: от яркости тени до яркости спокойного Солнца.

В более высоких атмосферных слоях пятно может выглядеть совершенно иначе: оно может быть неразличимо со спокойным фоном или быть ярче него. Предполагается, что в атмосфере пятна имеет место нагрев, связанный с сильным магнитным полем, но механизм этого нагрева и его величина крайне мало изучены. Наблюдения на миллиметровых волнах (ALMA) и сантиметровых (РАТАН), несущие информацию о хромосферных высотах и переходной области к короне, позволяют исследовать эту область атмосферы пятна.

В то же время, излучение радиодиапазона имеет ряд преимуществ, и в первую очередь это простота интерпретации наблюдений. Механизмы возникновения радио излучения хорошо изучены и разработаны методики диагностики тепловой структуры солнечной атмосферы по тормозному и циклотронному излучению.

В миллиметровом диапазоне волн уже первые измерения на новом инструменте ALMA показывают сложную высотную структуру над пятном в хромосфере АО 12470. На РАТАН-600 на коротких волнах сантиметрового диапазона для этой АО (рис.2) обнаружено, что наряду с существованием ярких радиоисточников над пятнами присутствует холодное излучение с температурой ниже температуры окружающей плазмы. В результате комбинирования наблюдений на РАТАН-600 и ALMA получена более полная информация о зависимости интенсивности солнечного пятна от длины волны. При этом информация о температурах на высотах нижней и средней хромосферы доступна из данных ALMA, а на высотах верхней переходной области и нижней короны – из данных РАТАН-600. Сопоставление данных, полученные на двух инструментах, указывает на значительную неоднородность плазмы не только в картинной плоскости, но и по высоте, что требует адекватных модельных объяснений (см. рисунок 2).

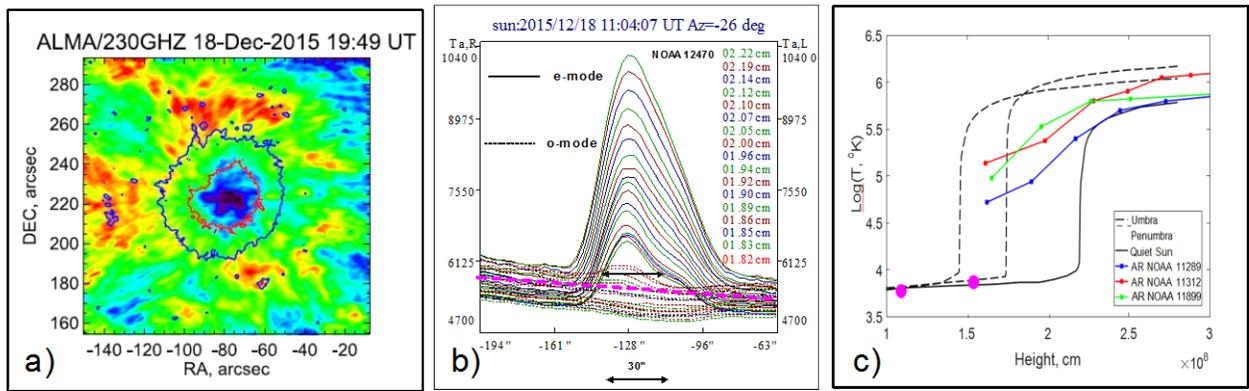


Рисунок 2 – А) Карта АО 12470, полученная на ALMA с разрешением 4.9×2.2 arcsec на волне 3 мм . В) Многоволновые сканы ПАТАН-600 для АО 12470 для е-моды (сплошные) и о-моды (пунктиром). В) Сопоставление зависимостей температуры от высоты, полученным по данным ALMA и ПАТАН-600 с принятыми моделями из работ

2.3. Наблюдение уникального вспышечного объекта и интерпретация его природы излучения

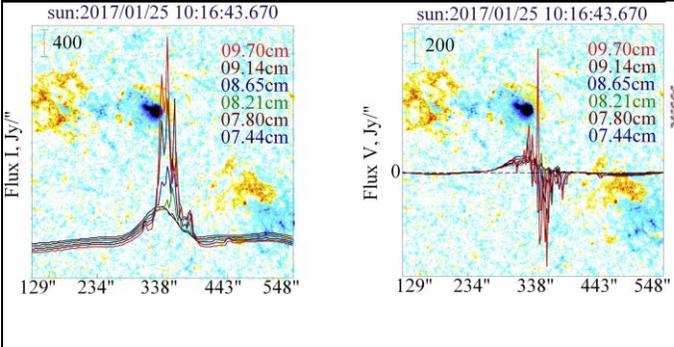
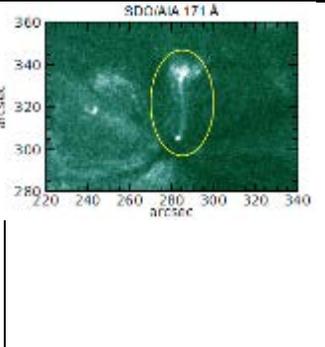
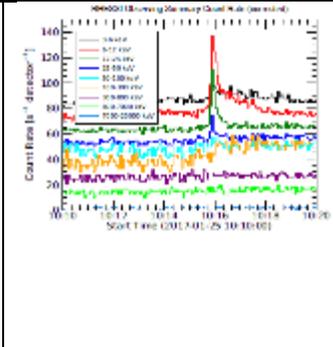
По детальным спектрально-поляризационным наблюдениям активной области АО 12470 25 января 2017г. было проведено уникальное наблюдение мощного “микровсплеска” с квазипериодическими пульсациями радиоизлучения (КПП), не отмеченного мировыми мониторингами разных диапазонов. Особенность спектра состоит в том, что плавное увеличение потока с длиной волны сменилось в диапазоне 3-4 ГГц резким взрывным уярчением в десятки раз превышающим яркость спокойного Солнца. Исследования временной эволюции и сопоставление с EUV (крайнем УФ) (рисунок 3) показали, что эта микровспышка класса B2 была инициирована появлением S-образной петли.

Наблюдаемое на ПАТАН-600 поляризованное радиоизлучение этой микровспышки генерировалось нетепловыми электронами, жесткое рентгеновское излучение которых было зарегистрировано на космическом спутнике RHESSI (рисунок 3).

Исследование показало, что радиоизлучение генерировалось одновременно в двух противоположных концах («ногах») магнитной веерной структуры солнечного пятна, расположенных в меридиональном направлении, и поэтому излучение от двух разнесенных мест было зарегистрировано на ПАТАН-600 одновременно. Право- и лево-поляризованные интенсивности излучения показали хорошую корреляцию друг с другом в низкочастотном диапазоне 3-4 ГГц, со средним характерным временем изменений около 1.35 с, в то время как для поляризованного сигнала это время оказалось в половину меньшим - 0.72 с.

Интерпретация тонкой спектральной и поляризационной структуры события состоит в возникновении квазипериодических пульсаций радиоизлучения как суперпозиции двух источников плазменного излучения, находящихся в магнитных полях разного знака.

Взаимодействие нетепловых электронов с плазмой и выделение вспышечной энергии происходило в двух противоположных концах петли и квазипериодически модулировалась основной и второй гармониками сосисочных осцилляций («sausage oscillations») вспышечной петли.

Радиотелескоп РАТАН-600	Спутник SDO/AIA	Спутник RHESSY
		
<p>Рисунок 3а – Радиовсплеск 25 января 2017, 10:16:43 UT., зарегистрированный на РАТАН-600. Интенсивность (слева) и поляризация (справа) наложены на фотосферную магнитограмму. Показаны длины волн: 9.70, 9.14, 8.65, 8.21, 7.80 и 7.44 см (сверху вниз)</p>	<p>Рисунок 3б – Вид области вспышки в крайнем УФ (10:15:13 UT), 171Å при распространении в корональной петле</p>	<p>Рисунок 3в – Регистрация рентгеновского потока в различных энергетических каналах от 3 keV до 20000 keV</p>

На Рисунках 3а,б,в приведены сканы АО на несколько длинах волн, изображение вспышки в на волне 171Å в рентгене.

Уникальность результата заключается в сочетании предельных параметров космических и наземных наблюдательных комплексов и регистрацией редкого вспышечного события с новым механизмом излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования микроволновых спектров поляризационных наблюдений в активных областях над пятнами были получены однозначные данные о структуре циклотронного излучения с отождествлением основных гармоник (2-й, 3-й и 4-й) на обеих модах.

Результаты сопоставления данных микроволновых наблюдений на РАТАН-600 в диапазоне 3-18 ГГц с субмиллиметровыми данными радиотелескопа ALMA указывают на значительную неоднородность плазмы не только в картинной плоскости, но и по высоте, что противоречит существующим моделям.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В ИНОСТРАННЫХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

1. T. I. Kal'tman, and V. M. Bogod, On Detecting the Fourth Gyrofrequency Harmonic in Microwave Emission Spectra above Sunspots, ISSN 0010-9525, Cosmic Research, 2019, Vol. 57, No. 1, pp. 29–37. © Pleiades Publishing, Ltd., 2019. The study was supported in part [Program 28](#) of the Presidium of the Russian Academy of Sciences .

В МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЯ

1. Кудрявцев И.В., Кальтман Т.И., Ватагин П.В., Чариков Ю.Е. Динамика функции распределения быстрых электронов при их распространении во вспышечной плазме с учётом развития пучковой неустойчивости, Труды ССЗФ, ГАО РАН, 2018, стр. [258-261](#),