

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

УДК
№ госрегистрации



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по Программе ПРАН П7

2.17. «Физика магнитосфер активных областей в переходной области
хромосфера-корона и нижней короны Солнца по микроволновым
наблюдениям»

Зам. директора по научной работе

Сотникова Ю.В.





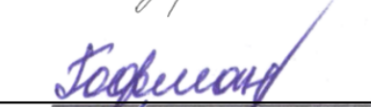
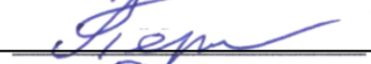





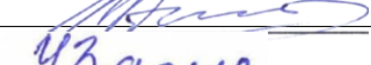
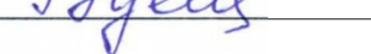
Руководитель темы

Богод В.М.

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН «21» ноября 2016 года (протокол №348).

Нижний Архыз
2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы		Богод В.М.
Заведующий лабораторией, д.ф.м.н.		(Введение, заключение раздел 1)
В.н.с. профессор, д.ф.м.н. СПбГУ		Яснов Л.В. (раздел 1)
Научный сотрудник СПбГУ		Ступишина О.В. (раздел 1)
Младший научный сотрудник		Курочкин Е.А. (раздел 1)
<u>Стажер-исследователь</u>		Гофман А.А. (раздел 1)
Заведующий группой		<u>Перваков</u> А.А. (раздел 1)
Ведущий инженер		<u>Балдин</u> С.В. (раздел 1)
Ведущий инженер		Стороженко А.А. (раздел 1)
Старший инженер		<u>Шендрик</u> А.В. (раздел 1)
Инженер-программист		<u>Казанина</u> Т.Н. (раздел 1)
<u>Инженер-программист</u>		<u>Хубиева</u> Н.В. (раздел 1)
Техник		<u>Ангелюк</u> М.А. (раздел 1)
<u>Нормоконтролер</u>		<u>Узденова</u> Ш.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 15 с., 5 рис., 1 прил.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600

Цель работы – проведение фундаментальных и прикладных исследований, в области астрономии и смежных с ней науках по направлению:

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 в определяющие их различие (масштабы распространения, величины магнитных полей, температур и плотностей плазмы). Магнитосфера - это локализованная плазменная структура, строение и физические процессы в которой определяются, в основном, двумя факторами: (i) Магнитными полями, генерируемыми локальной и сравнительно жесткой системой электрических токов; (ii) Воздействием внешней плазмы относительно магнитосферы данной АО через потоки корпускулярных частиц, электромагнитное излучение, МГД-волны, ударные волны, и т.п. Важными открытиями для концепции магнитосферы АО ознаменовались совместные исследования на VLA и на РАТАН-600 в дециметровом диапазоне радиоволн. Это обнаружение нетеплового гало и связь микровсплесковой компонентой с шумовыми бурями, что и являлось целью исследований в 2016г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	13
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	15
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	15

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АО – активная область

AR NOAA- номер активной области в каталоге NOAA

VLA – радиотелескоп в США

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

MDI/SDO.

ВВЕДЕНИЕ

Микровсплески были обнаружены по наблюдениям на РАТАН-600 в 1999 г. Это весьма слабо излучающие структуры с величиной потока излучения около 0.001 с.е.п. Они были сопоставлены со спайками в метровом диапазоне на радиотелескопе Nancau, Франция и была обнаружена их корреляция. Таким образом, стало ясно, что высокочастотный край всплесковой В-компоненты простирается до дециметрового диапазона (0.2-0.3 м). Спектры излучения микровсплесков в дециметровом диапазоне указывают на существование границы, на которой энергия ускоренных электронов перемещающихся в петельной структуре превышает энергию магнитного поля. При этом, и стабильные активные области S-компоненты обнаруживают на этих частотах переход к В-компоненте, в которой присутствует большое разнообразие типов всплесков и шумовые бури. Наблюдения и моделирование показали, что природа всплесковой компоненты обусловлена возбуждением верхнегибридных волн в условиях двойного плазменного резонанса.

В результате сопоставления спектров активных областей Солнца по наблюдениям в микроволновом диапазоне на РАТАН-600 (S-компонента) со всплесковой компонентой в метровом диапазоне длин волн на VLA (США) было обнаружено наличие мощной и длительной шумовой бури именно в районе слабо распадающейся активной области (при наличии на диске мощных активных областей). Полученные данные указывали на непосредственную связь между обнаруженным ранее на РАТАН-600 "дециметровым гало" с нетепловым излучением длительно существующих источников шумовых бурь.

Созданию методики диагностики физических параметров плазмы в области генерации длительного нетеплового излучения активных областей и посвящено данное исследование.

1 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ОБЛАСТЯХ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОВСПЛЕСКОВ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Основной особенностью спектра всех наблюдавшихся МВ оказалась неизменная высокочастотная граница около 1,1 - 1,4 ГГц. Анализ, проведенный в работе [Yasnov et al.,2008], показал высокую вероятность того, что МВ являются проявлением Шумовых бурь (NS) в дециметровом диапазоне длин волн, и являются составной частью этого общего процесса. В рамках единой модели генерации радиоволн для МВ и NS было показано, что, в отличие от всплесков радиоизлучения I типа, являющихся составной частью NS, МВ связаны с некогерентным механизмом генерации ленгмюровских волн. Однако следуя механизму генерации работы [Yasnov et al.,2008] ленгмюровских волн трудно понять причину постоянства высокочастотной границы спектра МВ. Проведены расчеты спектральных характеристик МВ с учетом тормозного и циклотронного поглощений и с учетом инкремента верхнегибридных волн. Они показали, что наиболее вероятной областью генерации МВ в солнечной атмосфере является переходная область. МВ наблюдались в диапазоне от 1,036 до 1,306 ГГц, что согласуется с модельными расчетами.

Метод. В данной работе мы развиваем механизм радиоизлучения МВ, связанный с генерацией ленгмюровских волн [Yasnov et al.,2008], но при этом учитываем усиление этого излучения на механизме, основанном на двойном плазменном резонансе (DPR) [Zhelezniakov, Zlotnik, 1975]. Затем мы определяем возможные области генерации МВ в активной области на основе расчётов инкрементов верхнегибридных волн в рамках известной модели солнечной атмосферы с учетом циклотронного и тормозного поглощений рассчитываем спектральные характеристики их радиоизлучения.

Апробация метода. Принятая модель магнитного поля, содержит два разнесенных и противоположно направленных диполя, что обычно приводит к появлению источников, связанных с нулевым продольным магнитным полем (NLS, Neutral Line Source), рассмотренная в работе [Yasnov, 2014]. Такие источники тесно связаны со вспышечными явлениями в активной области и изучаемые МВ тесно связаны с ними. Было принято, что область на фотосфере, расположенная на оси диполей имеет напряжённость $B_{ph} = 2000-3000$ Гс. Структура поля приведена на рис.1 для пяти гармоник гирочастоты.

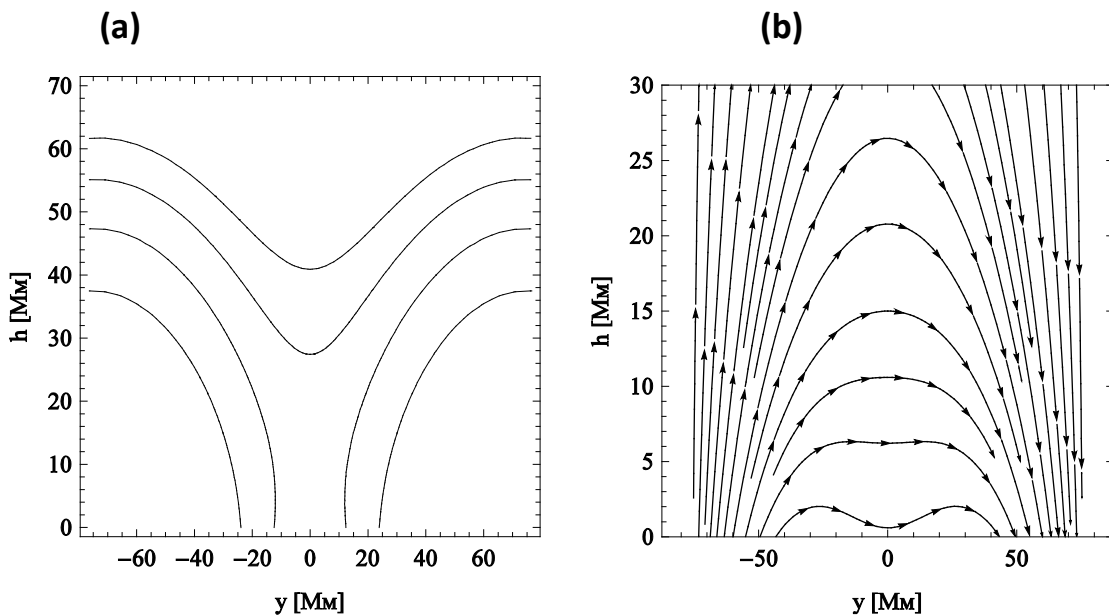


Рис. 1. Высотная структура магнитного поля для $B_{nls} = 100$ Гс и $B_{ph} = 2000$ Гс; (a) - гирорезонансные уровни с номерами гармоник $s = 2 - 5$ для частоты $f = 1$ ГГц; (b) – структура силовых линий.

Наблюдения. В качестве примера МВ в данной работе было исследовано событие, произошедшее 11 марта 2011 года, зарегистрированное РАТАН-600. Совмещение записи многоволнового скана РАТАН-600 с изображением магнитограммы, полученной инструментом SDO/Heliospheric Magnetic Imager (SDO/HMI, <http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html>), приведенное на рис. 2, показало,

что МВ в правополяризованной компоненте излучения приходится на положение АО NOAA 11166.

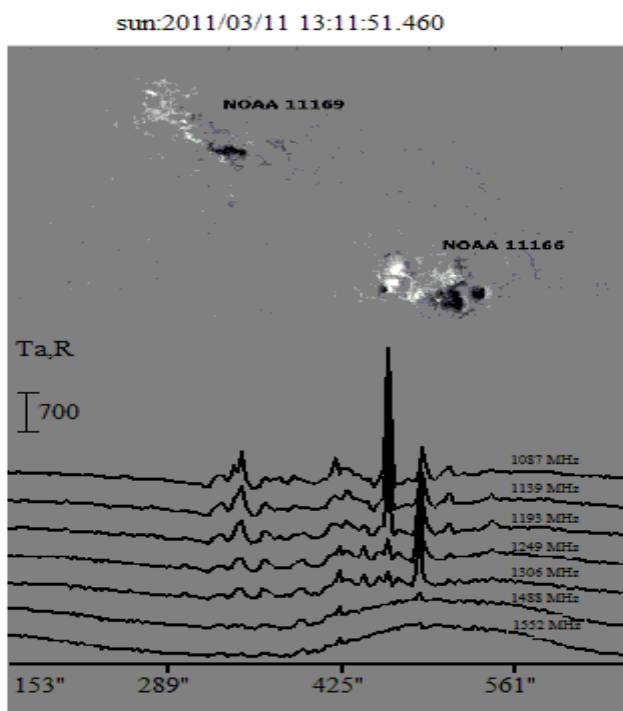


Рис. 2. Совмещенное изображение записи сканов Солнца на частотах от 1087 МГц до 1552 МГц в дециметровом диапазоне длин волн в каналах правополяризованного излучения РАТАН-600 и магнитограммы КА MDI/SDO. Над активными областями NOAA 11166 и 11169 расположены длительно существующие источники микровсплесков.

Высокая вспышечная активность –АО NOAA 11166 произвела 8 рентгеновских вспышек балла С (от С1.1 до С5.5), а с момента появления на диске АО NOAA 11166 в ней зарегистрировано 13 вспышек балла С (от С1.2 до С9.4), 3 вспышки балла М (от М1.1 до М1.7) и одна вспышка балла Х1.5, произошедшая 09.03.2011, за 2 дня до регистрации МВ (<https://solarmonitor.org>).

Моделирование. Мы рассматриваем генерацию радиоизлучения в рамках модели с DPR, действие которого заключается в повышении эффективности генерации верхнегибридных волн, если их частота близка к гармонике электронной циклотронной частоты.

Была рассмотрена генерация радиоизлучения в рамках модели с DPR, действие которого заключается в повышении эффективности генерации верхнегибридных волн, если их частота близка к гармонике электронной циклотронной частоты. На рис.3 приведены высотные зависимости верхнегибридной частоты и гармоник гирочастоты для модели активной области. Видно, что в диапазоне частот около 1 ГГц для $B_{nls} = 100$ Гс возможно появление 2-3 полос излучения, а для $B_{nls} = 50$ Гс – около 5 полос, возникающих вблизи переходной области, высота которой - около 3×10^8 см для области, находящейся посередине между диполями ($y = 0$), то есть в зоне возможного существования NLS.

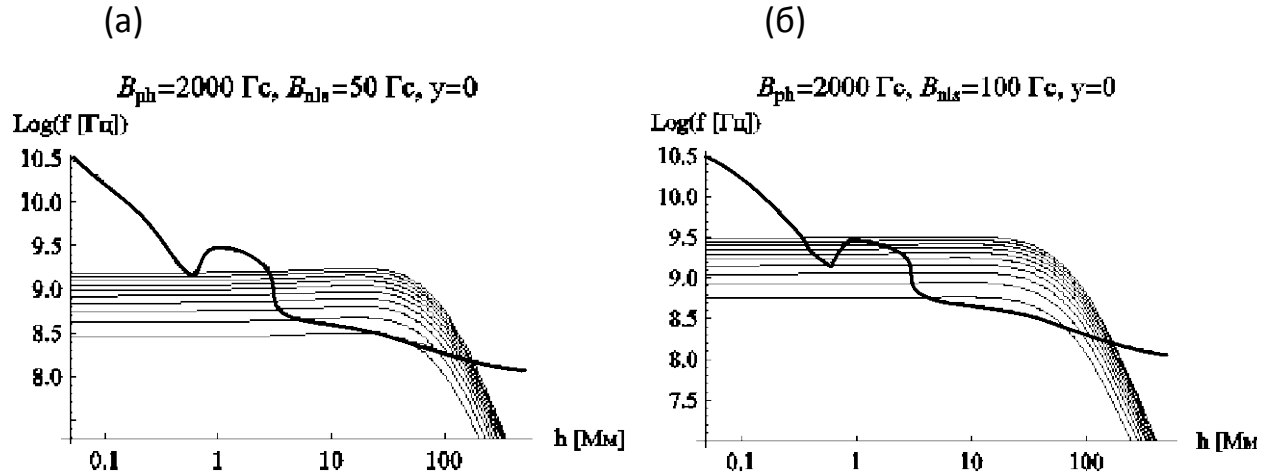


Рис. 3. (а), (б) – распределение верхнегибридной частоты и гармоник гирочастоты для области, расположенной между диполями ($y = 0$) с номерами гармоник $s = 2 - 11$ по высоте для $B_{nls} = 100$ Гс и для $B_{nls} = 50$ Гс.

Был проведен учет влияния на спектры МВ различия инкрементов верхнегибридных волн, поскольку возможность появления в спектре излучения полос зebra-структуры зависит от характеристик энергичных электронов.

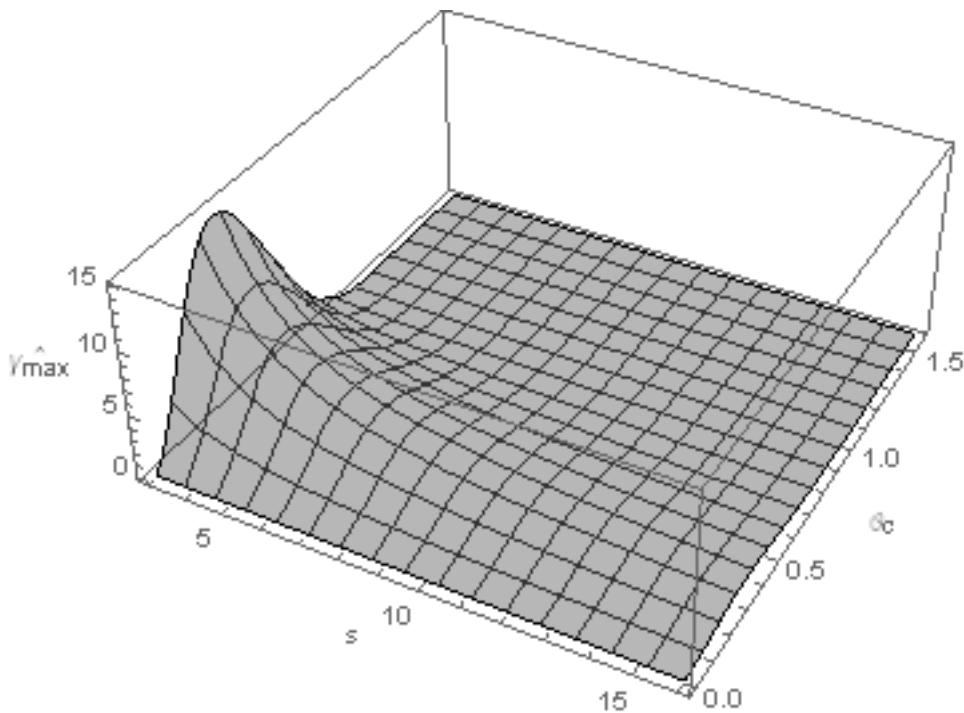


Рис. 4. Спектр инкремента затухания верхнегибридных волн для энергии ускоренных электронов $E = 30$ кэВ, $\xi = 5$, $\Omega = 2\pi \times 10^8$ Гц.

Расчеты показывают, что инкремент максимален при значении угла конуса потерь $\vartheta_c^{max} = 0,3 - 0,4$. Из рис. 4 видно, что с увеличением s значение инкремента для ϑ_c^{max} снижается. Степень снижения величины инкремента при ϑ_c^{max} не зависит от степенного индекса ξ , гирочастоты Ω и значения импульса отсечки p_{z0} . Из этих расчетов также следует, что наиболее вероятная возможность генерации МВ связана с максимальным магнитным полем в диапазоне $B_{nls} < 150$ Гс. При $B_{nls} > 150$ Гс, радиоизлучение полностью поглощается.

Окончательные расчетные спектры получаем после умножение на инкремент рис.4. На рис.5 представлено качественное поведение спектров с учетом инкремента, которое хорошо совпадает со спектрами многоволновых наблюдений рис.2.

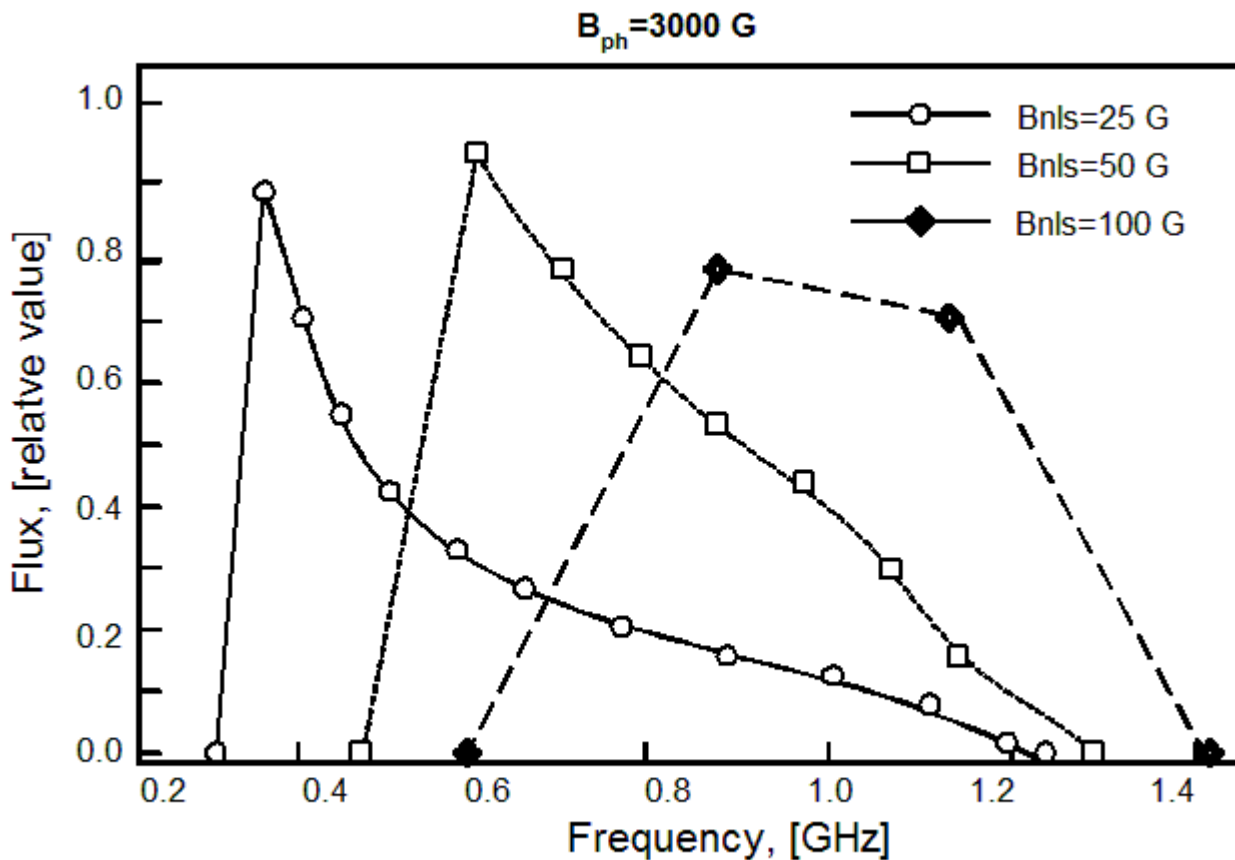


Рис. 5. Спектральные характеристики радиоизлучения с учетом максимального инкремента для фотосферного поля $B_{ph} = 3000 \text{ Гс}$.

Выводы. Проведено исследование явления микровсплесков дециметрового диапазона. Выполненные расчеты и сопоставление их с данными многоволновых наблюдений показали следующее:

- Высокочастотная граница диапазона генерации МВ простирается до частот около 1,4 ГГц.
- Показано, что в рамках плазменного механизма генерации радиоизлучения, МВ должны возникать в областях источников NLS, то есть в областях между основными магнитными полями противоположной направленности.

- Высокочастотная граница спектра МВ зависит от электронной концентрации и не зависит от напряженности магнитного поля в области их генерации.
- В соответствие с моделью солнечной атмосферы, генерация МВ в дециметровом диапазоне длин волн происходит в переходной области атмосферы активной области, то есть на высоте около 3×10^8 см.
- Частотный диапазон генерации МВ ограничен как с высокочастотной, так и с низкочастотной области спектра вследствие тормозного поглощения вышележащих над гирослоем слоев солнечной атмосферы и гирорезонансного поглощения в самом гирослое. При этом тормозное поглощение эффективно в высокочастотной области, а циклотронное поглощение – в низкочастотной области.
- Наиболее вероятная возможность генерации МВ связана с областями, где магнитное поле около 100 Гс, а электронная плотность повышена в 1,5 раза по сравнению с плотностью на тех же высотах в модели солнечной атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование микровсплесков (МВ) дециметрового диапазона в активных областях на Солнце позволило объяснить на примере события 11 марта 2011 года природу и механизм генерации дециметровых МВ, на основе рассмотрении явления двойного плазменного резонанса и последующей трансформации верхнегибридных волн при их взаимодействии с низкочастотными плазменными волнами. Определена область генерации по частоту диапазону (от 1,036 до 1,306 ГГц) и объяснены причины затухания генерации вне частотного диапазона. Указано на общий характер излучения МВ с шумовыми бурями и зebra структурой.

Дополнительные работы были связаны с развитием измерений в дециметровом диапазоне, в котором наблюдения затруднены из-за сильных промышленных помех.

Разрабатывается специальная приемная аппаратура с высокоскоростной регистрацией для устранения помех в текущем режиме наблюдений.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В ИНОСТРАННЫХ РЕФЕРИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

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.
2. L. V. Yasnov, A. A. Gofman, A. G. Stupishin On the Spectrum and Generation Regions of Solar Microbursts in the Decimeter Wave Band, Solar Physics, August 2016, Volume 291, Issue 6, pp 1819-1828, <http://link.springer.com/article/10.1007/s11207-016-0932-z>