

Моргачев Александр Сергеевич

**МИКРОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И
ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в Научно-исследовательском радиофизическом институте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук
МЕЛЬНИКОВ Виктор Федорович

Официальные оппоненты:

АЛТЫНЦЕВ Александр Тимофеевич,
доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научного направления по радиоастрофизике Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук»

ЧАРИКОВ Юрий Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории космических лучей Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук»

Защита состоится 13 декабря 2019 года в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 при ФГБУН "Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук" (ГАО РАН) по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2019/09/Morgachev_diss.pdf).

Автореферат разослан "___" _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Булига Станислава Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы

Диссертационная работа посвящена изучению солнечных вспышек – явлению мощного взрывного энерговыделения в атмосфере Солнца, наблюдаемого в виде потоков высокоэнергичных частиц и плазмы, а также в широком диапазоне электромагнитного излучения – от километровых радиоволн до гамма-лучей. По современным представлениям в процессе вспышки происходит ускорение электронов солнечной плазмы до десятков МэВ, часть их которых захватывается в магнитные петли в активной области, генерируя широкополосное микроволновое излучение (на частотах от 3 до 300 ГГц), и формируя вспышечную петлю. Основной нерешенной проблемой солнечных вспышек является механизм энерговыделения и ускорения частиц.

Существующие на данный момент модели ускорения частиц в солнечных вспышках до высоких энергий [45] предполагают различные пространственные распределения их параметров по петле (концентрация, энергетический спектр,pitch-угловое распределение и др.). Диагностика частиц во вспышечных условиях может дать ответ на вопрос о механизме ускорения в отдельном событии. Различные пространственные и временные распределения параметров нетепловых электронов и фоновой плазмы во вспышечной петле, в свою очередь, предполагают различные распределения характеристик радиоизлучения по источнику, таких как интенсивность и степень поляризации. Современные солнечные радиотелескопы ведут наблюдения с высоким пространственным и временным разрешением на различных частотах, что позволяет проводить детальное изучение солнечных вспышек.

Наблюдаемое микроволновое излучение вспышечных петель генерируется преимущественно гиротронным (ГС) механизмом ускоренными электронами со среднерелятивистскими энергиями [7, 20]. Параметры ГС излучения очень чувствительны к виду распределений электронов по энергиям и pitch-углам, величине и направлению магнитного поля, плотности и температуре фоновой плазмы. В связи с этим на основе радиодиагностики есть принципиальная возможность восстановления параметров нетепловых электронов, магнитного поля и плазмы в петлях по микроволновым наблюдениям. В работе [14] разработан программный пакет,

позволяющий проводить быстрый расчет интенсивности обыкновенной и необыкновенной волн однородного источника ГС излучения для различных значений концентрации ускоренных электронов, показателя их степенного энергетического спектра, вида пичч-углового распределения, температуры и плотности фоновой плазмы, напряженности магнитного поля, угла зрения и других. Таким образом, для определения параметров среды в различных квазиоднородных областях вспышечной петли необходимо найти такой набор параметров ГС источника, чтобы теоретически рассчитываемые характеристики радиоизлучения совпадали с наблюдаемыми.

Гиротронное излучение электронов можно представить в виде суммы двух циркулярно поляризованных мод – обыкновенной и необыкновенной. Коэффициенты излучения и поглощения для каждой из мод различны и сильно зависят от напряженности и направления магнитного поля, энергетического спектра нетепловых электронов [10, 7], а также от типа электронного пичч-углового распределения [11]. Теоретические расчеты и радионаблюдения [10, 7] показывают, что в большинстве случаев в микроволновом излучении солнечных вспышек доминирует необыкновенная мода. Преобладание же обыкновенной моды может быть обусловлено следующими причинами: 1) большой оптической толщиной источника [4]; 2) взаимодействием мод при квазиперечном распространении волны относительно линий магнитного поля [8, 38]; 3) излучением нетепловых позитронов, возникших при ядерных реакциях во вспышечных петлях [15]; 4) возникновением продольной анизотропии нетепловых электронов в некоторой области петли при условии наблюдения в квазиперечном к линиям магнитного поля направлении [11, 24]. Таким образом, поиск и исследование солнечных вспышек, в которых реализуется доминирование обыкновенной моды микроволнового излучения, представляет большой интерес для изучения во вспышечных условиях описанных выше эффектов.

Известно, что в процессе вспышки происходит заполнение вспышечной петли плотной хромосферной плазмой [6]. Разогрев и последующее испарение хромосферы обусловлены потоками энергии в виде ускоренных частиц и тепла, распространяющихся от области энерговыделения в нижележащие плотные слои хромосферы. В результате, плотная плазма, заполняющая петлю, оказывается источником дополнительного потока радиоизлучения, генерируемого за счет

теплового тормозного механизма. Таким образом, поток принимаемого радиотелескопом микроволнового излучения представляет собой сумму потоков гиротронного излучения энергичных частиц и теплового тормозного излучения горячей плазмы, что может приводить к ошибкам при микроволновой диагностике. Для правильного определения потока и спектрального индекса ГС-излучения необходимо корректировать данные наблюдений путем вычета из общего потока компоненты, связанной с тепловым тормозным излучением.

Наблюдения Солнца в суб-терагерцовом (суб-ТГц) радиодиапазоне стали доступными только в 21 веке благодаря Солнечному Субмиллиметровому Телескопу [18] и Кельнской Обсерватории Миллиметровой и Субмиллиметровой астрономии [22] на частотах около 200 и 400 ГГц. Результаты наблюдений показали, что большинство событий имеют отрицательный наклон спектра между 200 и 400 ГГц, т.е. уменьшающийся с частотой спектральный поток может рассматриваться как продолжение гиротронного спектра [40, 22]. Удивительно, что в ряде других событий обнаружен положительный наклон спектра. Эта особенность наблюдается как в течение импульсной [33, 19] фазы, так и на фазе спада излучения солнечных вспышек. Подобная картина спектра является необычной. Объяснить ее наличием дополнительного компактного источника ГС излучения со спектральным максимумом выше 400 ГГц не удастся, т.к. такая модель требует очень больших (более 2500 Гс) значений хромосферных магнитных полей [36]. В связи с этим были предложены другие модели формирования подобного микроволнового спектра. Среди них – гиротронное излучение нетепловых электронов при наличии эффекта Разина [2], оптически толстое тепловое тормозное излучение [13], обратное комптоновское излучение [17], черенковское излучение от хромосферных слоев [13], синхротронное излучение в стохастической среде [13], плазменное излучение пучков электронов, ускоренных в хромосфере вблизи оснований магнитных петель [44]. Однако все перечисленные модели имеют трудности при интерпретации и до конца не проверены на основе имеющихся наблюдательных данных. Таким образом, загадочное поведение микроволнового спектра на высоких частотах привлекает большое внимание ученых, а его всестороннее исследование с привлечением новейших данных, возможно, позволит с другой стороны взглянуть на физику солнечных вспышек, лучше понять процессы и условия, связанные с их

возникновением. С 2012 года на миллиметровых волнах (на частотах 93 и 140 ГГц) вновь начал работу радиотелескоп Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана РТ-7.5, г. Дмитров [37]. Очевидно, наблюдения в диапазоне частот 100-200 ГГц важны для улучшения спектрального покрытия радиоизлучения и для изучения слабых «суб-ТГц» событий, которые случаются чаще, чем сильные вспышки [9] и характеризуются более простой магнитной конфигурацией.

Цель диссертационной работы: разработка и применение методов определения физических параметров нетепловых электронов, магнитного поля и тепловой плазмы в различных участках солнечных вспышечных петель на основе наблюдений в микроволновом радиодиапазоне с высоким пространственным разрешением. В работе ставятся и решаются следующие задачи:

1) Определение влияния тормозного излучения вспышечной тепловой плазмы на наблюдаемый спектр гиротронного излучения нетепловых электронов для статистически значимого числа вспышек.

2) Разработка метода определения параметров нетепловых электронов, магнитного поля и тепловой плазмы в различных участках вспышечной петли на основе прямой подгонки теоретически рассчитанного микроволнового излучения под наблюдаемое.

3) Интерпретация обнаруженной в солнечной вспышке 19 июля 2012 г. необычной пространственно-временной инверсии знака степени поляризации наблюдаемого микроволнового излучения, используя метод прямой подгонки, а также моделирование кинетики и микроволнового излучения нетепловых электронов.

4) Поиск солнечных вспышек с признаками доминирования обыкновенной моды микроволнового излучения по данным наблюдений с высоким пространственным разрешением. Установить, связано ли доминирование обыкновенной моды с формированием квазипродольной пичч-угловой анизотропии нетепловых электронов во вспышечных петлях отобранных событий.

5) Интерпретация наблюдаемого положительного наклона спектра миллиметрового излучения солнечных вспышек на основе анализа многоволновых данных наблюдений и моделирования микроволнового излучения солнечных вспышечных петель.

Научная новизна данной диссертационной работы в первую очередь связана с разработкой нового для целей радиодиагностики солнечных вспышечных петель метода прямой подгонки, предполагающего использование данных наблюдений следующего поколения солнечных радиотелескопов – спектрорадиогелиографов Сибирского радиогелиографа (СРГ) и Mingantu Ultrawide Spectral Radioheliograph (MUSER), в скором времени начинающих свою работу. Помимо этого в диссертационной работе проводится исследование солнечных вспышек в неиспользуемом для этих целей ранее диапазоне микроволнового излучения 100-200 ГГц по данным наблюдений радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Баумана. Также при диагностике вспышечных петель использовались данные наилучшего в настоящий момент солнечного радиотелескопа – радиогелиографа Нобеяма и наиболее совершенных в своем классе инструментов: магнитографа Helioseismic Magnetic Imager (HMI) и ультрафиолетового телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA), находящихся на космической обсерватории Solar Dynamic Observatory (SDO).

Новизна и оригинальность диссертационной работы определяются следующим:

1) Впервые дана интерпретация пространственно-временной инверсии знака степени поляризации в солнечной вспышке 19 июля 2012 г. С этой целью применен метод прямой подгонки для определения параметров вспышечных петель в различных ее участках. Применение метода прямой подгонки позволило обнаружить признаки формирования в вершине вспышечной петли квазипродольной пичч-угловой анизотропии нетепловых электронов.

2) Впервые дана интерпретация положительного наклона спектра миллиметрового излучения для трех солнечных вспышек в частотном диапазоне 93 – 140 ГГц по данным наблюдений радиотелескопа МГТУ им. Баумана РТ-7.5.

3) Предложен новый алгоритм фитирования наблюдаемых характеристик микроволнового излучения вспышечных петель теоретически рассчитываемыми. В предыдущих исследованиях для восстановления параметров магнитного поля, тепловых и нетепловых электронов в солнечных вспышках методом прямой подгонки применялся симплекс метод минимизации функционала. В данной работе для определения параметров солнечных вспышек предложен и реализован метод минимизации, основанный на стратегии генетического алгоритма.

4) Впервые проведен анализ вклада теплового тормозного излучения в общий поток принимаемого микроволнового излучения для статистически значимого числа вспышек. В результате анализа установлено, что на фазе спада микроволнового всплеска вспышечная плазма может оказывать значительное влияние на наблюдаемый поток и спектральный индекс гиротронного излучения электронов.

Научное и практическое значение

1) Обнаружение признаков доминирования обыкновенной моды микроволнового излучения в различных участках нескольких солнечных вспышечных петель важно для дальнейшего изучения таких вспышечных физических эффектов как гиротронное излучение позитронов, формирование питч-угловой анизотропии нетепловых электронов, эффект квазипоперечного распространения.

2) Обнаруженные признаки формирования квазипродольного питч-углового распределения нетепловых электронов в солнечной вспышке 19 июля 2012 г. накладывают ограничения на возможный механизм ускорения частиц в данном событии.

3) Различные интерпретации положительного наклона спектра миллиметрового излучения между частотами 93 и 140 ГГц для трех солнечных вспышек, данные на основе моделирования вспышечного излучения, важны для объяснения наблюдающегося в серии событий явления роста с частотой суб-терагерцового спектра, не согласующегося с существующей теорией формирования вспышечного микроволнового излучения.

4) Развитие автоматизированного метода восстановления параметров вспышечных петель по их микроволновому излучению на основе прямой подгонки имеет большое значение для изучения физических процессов, происходящих в солнечных вспышках, и для установления их природы. Особенно актуальным для диагностики вспышек этот метод становится в настоящее время с началом работы нового поколения радиогелиографов: CPG и MUSER.

5) При определении вклада теплового тормозного излучения плазмы в общий поток наблюдаемого микроволнового излучения солнечных вспышечных петель получены важные рекомендации для радиодиагностики нетепловых ускоренных электронов и магнитного поля. При определении их параметров на основе

микроволновых наблюдений наиболее точные результаты можно получить на фазах роста и максимума всплеска.

Положения, выносимые на защиту

1) Развитие и применение автоматизированного метода определения параметров нетепловых электронов, магнитного поля и тепловой плазмы в солнечных вспышечных петлях, основанного на фитировании характеристик наблюдаемого микроволнового излучения теоретически рассчитываемыми.

2) Обнаружение признаков доминирования обыкновенной моды оптически тонких источников микроволнового излучения в четырех из сорока солнечных вспышечных петель. Объяснение пространственно-временной инверсии знака степени поляризации микроволнового излучения на частоте 17 ГГц, обнаруженной во вспышечной петле 19 июля 2012 г., квазипродольной питч-угловой анизотропией нетепловых электронов.

3) Интерпретация положительного наклона миллиметрового спектра между частотами 93 и 140 ГГц, наблюдаемого в ряде солнечных вспышек, гиросинхротронным излучением нетепловых электронов из хромосферной области вспышечной петли и оптически толстым тепловым тормозным излучением хромосферной плазмы.

Достоверность полученных результатов подтверждена их обсуждениями на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах, а также публикациями в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах основных материалов, изложенных в диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих Всероссийских и международных конференциях:

- Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика" (Санкт-Петербург, Россия, 2012-2018);
- Ежегодная конференция "Физика плазмы в Солнечной системе" (Москва, Россия, 2013 - 2018);
- CESRA WorkShop (Prague, Czech Republic, June 24-29, 2013);

- Workshop and School on RadioSun (Beijing and Inner Mongolia, China, October 28-November 4, 2013);
- RadioSun WorkShop on Solar Flares and Energetic Particles (Saint-Petersburg, Russia, August 11-15, 2014);
- 14th European Solar Physics Meeting (Dublin, Ireland, September 8-12, 2014);
- 5th RadioSun Workshop and Summer School (Ceske Budejovice, Czech Republic, May 23-27, 2016);
- Solar Physics with Radio Observations-2016 (Nagoya, Japan, September 9-11, 2016).

Результаты диссертации также докладывались и обсуждались на научных семинарах в НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород), в Пулковской обсерватории (Санкт-Петербург), ИКИ РАН (Москва) Nobeyama Radio Observatory (Япония), University of Glasgow (Великобритания).

Практической апробацией работы является успешное выполнение проектов РФФИ: № 15-32-50987 мол_нр «Диагностика анизотропии ускоренных электронов по распределению круговой поляризации микроволнового излучения вдоль солнечных вспышечных петель»; № 16-32-00535 мол_а «Новые наблюдения и диагностика миллиметрового излучения солнечных вспышек»; № 14-02-00924 «Радио- и рентгеновская диагностика ускоренных электронов в солнечных вспышках», гранта РФФИ № 16-12-10448, а также международного проекта RADIOSUN FP7-PEOPLE-2011-IRSES-295272.

Личный вклад автора. Научные исследования, результаты которых представлены в диссертации, выполнены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с соавторами. Обработка данных наблюдений выполнялась автором самостоятельно, с использованием программного обеспечения, разработанного лично. Автор диссертации реализован набор программ для автоматизированного определения параметров солнечных вспышечных петель, а также программный пакет для трехмерного моделирования их микроволнового излучения. Программы для расчета кинетики энергичных электронов и их радиоизлучения во вспышечной петле были разработаны в Научно-исследовательском радиофизическом институте ННГУ им. Н.И. Лобачевского коллективом соавторов.

Публикации по теме диссертации

Автор имеет 11 опубликованных работ по теме диссертации, в научных журналах, рекомендованных ВАК:

- 1) Morgachev A.S., Polyakov V.E., Melnikov V.F. Contribution of thermal bremsstrahlung to microwave emission of solar flare loops // *Astronomy Reports*. – 2014. – V.58. – №5. – P.335-344.
- 2) Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. Radio diagnostics of the solar flaring loop parameters by direct fitting method // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2014. – V.54. – №7. – P.933-942.
- 3) Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F., Simoes J.A. Modeling the distribution of circular polarization degree of solar flare loops in event 19 July 2012 // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2015. – V.55. – №8. – P.1118–1123.
- 4) Morgachev A.S., Melnikov V.F., Kuznetsov S.A. Search for accelerated electron anisotropy signatures based on observed polarization of the flaring loop microwave emission // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2016. – V.56. – №8. – P.1045-1052.
- 5) Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S. et al. On the origin of the sub-THz emission from the 4 July 2012 solar flare // *Advances in Space Research*. – 2016. – V.57. – №7. – P.1449-1455.
- 6) Kuznetsov S.A., Zimovets I.V., Morgachev A.S., Struminsky A.B. Spatio-temporal dynamics of sources of HXR pulsations in solar flares // *Solar Phys*. – 2016. – V.291. – №11. – P.3385-3426
- 7) Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В., Моргачев А.С., Моторина Г.Г., Рыжов В.С., Жаркова Н.А., Нагнибеда В.Г. Анализ механизмов генерации излучения рентгеновского, микроволнового и миллиметрового диапазонов в плазме солнечной вспышки 5 июля 2012 г. // *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн*. – 2016. – №12. – С.85-97.
- 8) Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V. et al. Simulation of microwave emission from the magnetic arch with a growing millimeter spectrum // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2017. – V.57. – №8. – P.1028-1038.ë
- 9) Shain A.V., Melnikov V.F., Morgachev A.S. The role of quasi-transverse propagation effect in observed polarization of flare loop microwave radiation // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2017. – V.57. – №8. – P.988-996.

- 10) Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. et al. Millimeter and X-ray emission from the 5 July 2012 solar flare // *Solar Phys.* – 2018. – V.293. – №3. – id.50. – 15 p.
- 11) Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. Simulation of subterahertz emission from April 2, 2017 solar flare based on the multiwavelength observations // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2018. – V.58. – №.8. – P.1113-1122.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 171 страницу, включая 90 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 99 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показаны актуальность и цель данной работы, обсуждаются новизна, научная и практическая значимость, приведены результаты, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы, показан личный вклад автора.

Глава 1 посвящена разработке метода определения параметров нетепловых электронов, магнитного поля и тепловой плазмы в солнечных вспышечных петлях по их наблюдаемому радиоизлучению, а также изучению влияния тепловой плазмы на микроволновое излучение вспышек. Материалы главы опубликованы в работах [25, 26].

В разделе 1.1 говорится о характеристиках и основных источниках длительного микроволнового излучения вспышек, наблюдения которого позволяют проводить диагностику параметров ускоренных электронов и магнитного поля в солнечных вспышечных петлях. Таковыми источниками являются гиротронное излучение нетепловых ускоренных электронов и тепловое тормозное излучение вспышечной плазмы. Подчеркивается важность микроволновой диагностики для изучения механизмов ускорения и энерговыделения в солнечных вспышках. Цель первой главы диссертации – разработка и тестирование метода восстановления параметров вспышечных петель, а также статистическая оценка вклада теплового тормозного излучения в наблюдаемое микроволновое излучение вспышек.

В разделе 1.2 даются основные теоретические сведения о магнитотормозном и тормозном механизмах излучения одиночного электрона и ансамбля частиц.

Говорится об основных характеристиках гиротронного излучения нетепловых электронов. Описывается современный метод численного расчета гиротронных коэффициентов излучения и поглощения (быстрый ГС код).

Раздел 1.3 посвящен методу восстановления параметров нетепловых электронов, магнитного поля и фоновой плазмы в различных частях солнечных вспышечных петель на основе прямой подгонки теоретически рассчитываемых характеристик микроволнового излучения под наблюдаемые (метод прямой подгонки или метод фитирования). Дается математическая постановка задачи определения параметров однородного радиоисточника по информации о его излучении на нескольких частотах f_i . Она заключается в решении системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 I(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1) &= I_{obs}(f_1) \\
 V(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1) &= V_{obs}(f_1) \\
 &\dots\dots\dots \\
 I(x_1, x_2, \dots, x_n, f_k) &= I_{obs}(f_k) \\
 V(x_1, x_2, \dots, x_n, f_k) &= V_{obs}(f_k)
 \end{aligned}$$

где с левой стороны стоят теоретически рассчитываемые характеристики излучения (параметры Стокса I и V), а с правой – наблюдаемые, x_1, x_2, \dots, x_n – такие параметры среды, как концентрация и показатель степенного энергетического спектра электронов, напряженность и направление магнитного поля, концентрация фоновой плазмы и т.д. Из-за сложности гиротронных формул для решения системы из ее уравнений составляется функционал вида:

$$\begin{aligned}
 K(x_1, x_2, \dots, x_n) &= [(I(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1) - I_{obs}(f_1))^2 + (V(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1) - V_{obs}(f_1))^2 + \\
 &\dots\dots\dots \\
 &+ (I(x_1, x_2, \dots, x_n, f_k) - I_{obs}(f_k))^2 + (V(x_1, x_2, \dots, x_n, f_k) - V_{obs}(f_k))^2]^{1/2}
 \end{aligned}$$

и задача нахождения параметров источника излучения сводится к его минимизации специальными численными методами.

Говорится, что впервые в приложении к радиоизлучению солнечных вспышек задача восстановления параметров радиоисточника на основе прямого фитирования решалась в работах [12] и [16]. Авторами получена приемлемая точность определения основных параметров трехмерных модельных вспышечных петель. Однако для этого в каждом участке петли предполагался известным спектр микроволнового излучения более чем на 60 частотах в диапазоне от 1 до 18 ГГц. Цель данного раздела – оценить

возможности метода прямой подгонки для диагностики параметров солнечных вспышечных петель при ограниченном количестве наблюдательного материала, когда число переменных в системе (приведенной выше) практически совпадает с числом уравнений. Для проведения исследования был реализован и протестирован метод прямой подгонки при восстановлении параметров нетепловых электронов и магнитного поля различных модельных источников для различных наборов «наблюдательных» частот, с использованием и без использования данных о поляризации излучения и при возникновении эффекта квазипоперечного распространения вне источника.

В результате установлено, что наличие данных о поляризации излучения позволяет значительно повысить точность определения искомых параметров. Однако ее использование может также приводить к серьезным ошибкам в случае реализации эффекта квазипоперечного распространения. Для наилучшей точности восстановления частоты наблюдения должны равномерно находиться справа и слева от частоты спектрального максимума источника.

В разделе 1.4 приводятся результаты изучения вклада теплового тормозного излучения вспышечной плазмы в наблюдаемое микроволновое излучение солнечных вспышечных петель для статистически значимого числа вспышек. Базу данных для исследования составили 16 событий, одновременно наблюдавшихся радиогелиографом (NoRH) [32] и радиополяриметром (NoRP) Нобеяма [31] и рентгеновским спутником GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Для исследования по данным наблюдений спутника GOES в каналах мягкого рентгеновского излучения 1-8 А и 0.5-4 А было выполнено определение температуры и меры эмиссии вспышечной плазмы с помощью программ, разработанных в [39]. Используя полученные значения, был рассчитан поток радиоизлучения горячей плазмы F_{th} и поток «чистого» гиротронного излучения нетепловых электронов на частотах 17 и 35 ГГц. Выполнены вычисления параметра α , характеризующего наклон спектра радиоизлучения между 17 и 35 ГГц: $\alpha = \ln(F_{35}/F_{17})/\ln(35/17)$. Приведена таблица результатов вышеописанного анализа для 16 событий. Установлено, что в момент максимума радиовсплеска влияние теплового тормозного излучения на полный поток F_{tot} наблюдаемого микроволнового излучения и показатель наклона спектра незначительно ($F_{th}/F_{tot} < 4\%$ и $\Delta\alpha < 0.1$). На фазе спада же

вклад радиоизлучения плазмы становится существенным и может достигать 80% по потоку ($F_{th}/F_{tot}=80\%$) и полутора единиц по спектральному индексу ($\Delta\alpha=1.5$). Таким образом, при диагностике параметров нетепловых электронов и магнитного поля наиболее точные результаты можно получить, исследуя излучение на фазах роста и максимума всплеска, так как наблюдаемый спектр наиболее близок к гиротронному.

В разделе 1.5 приводятся основные результаты первой главы диссертации.

Глава 2 посвящена интерпретации наблюдаемых для некоторых солнечных вспышек поляризационных особенностей, связанных с пространственной и временной инверсией знака круговой поляризации микроволнового излучения во вспышечной петле. Материалы главы основаны на работах [26, 27, 28].

В разделе 2.1 говорится о различных физических эффектах, приводящих к инверсии знака наблюдаемой поляризации при неизменной ориентации магнитного поля. Некоторые из них связаны с особенностями источника ГС излучения ускоренных электронов (эффект большой оптической толщины и квазипродольной пичч-угловой анизотропии электронов [4, 24]). Другие же обусловлены появлением дополнительного микроволнового источника (излучение позитронов [15]) или влиянием среды на распространение электромагнитных волн (эффект квазипоперечного распространения [8, 38]). В некоторых случаях эти эффекты приводят к доминированию обыкновенной моды микроволнового излучения.

Изучение природы наблюдаемых особенностей поляризации микроволнового излучения во вспышечных петлях важно для проведения их более качественной радиодиагностики. Чтобы избежать ошибок при использовании метода прямой подгонки необходимо различать, связаны ли они со свойствами самого источника или обусловлены другими физическими эффектами.

В разделе 2.2 обсуждается вспышка 19 июля 2012 г., для которой была обнаружена необычная пространственно-временная инверсия знака круговой поляризации на частоте 17 ГГц по данным наблюдений на радиогелиографе Нобейма. Это событие произошло на западном лимбе Солнца, время максимума – 05:22 UT. Основным наблюдательным фактом является инверсия знака круговой поляризации вдоль вспышечной петли от положительного значения в вершине до отрицательного в основаниях в течение всего всплеска. Помимо этого, существуют области (в ногах

петли), в которых происходит смена знака поляризации со временем. В разделе 2.2 приводятся карты пространственного распределения поляризации и интенсивности излучения, а также его временные профили из различных участков петли. Отмечается, что инверсия поляризации такого типа не указывалась в других вспышечных событиях [38, 5], поэтому задача данного раздела – объяснить наблюдаемые во вспышке 19 июля 2012 г. поляризационные особенности.

В качестве начального анализа было проведено восстановление концентрации и показателя энергетического спектра ускоренных электронов, напряженности и направления магнитного поля в различных участках вспышечной петли с помощью метода прямой подгонки (Глава 1). Для этого использовались данные о временных профилях потока излучения на частотах 17 и 34 ГГц и степени круговой поляризации на частоте 17 ГГц (по данным NoRH). Восстановление проводилось в предположении о степенном энергетическом спектре электронов ($f(E) \propto E^{-\delta}$) в диапазоне от 100 кэВ до 10 МэВ и для двух электронных питч-угловых распределений: изотропном $f(\mu) \propto I$ и пучковом $f(\mu) \propto \exp(-(\mu - \mu_0)^2 / \Delta\mu^2)$, где μ – косинус питч-угла. В результате получено, что в вершине петли для изотропного или слабо-анизотропного питч-углового распределений не удастся найти такой набор адекватных значений концентрации и показателя спектра электронов, напряженности и направления магнитного поля, при которых теоретически рассчитанные потоки и поляризация совпадали бы с наблюдаемыми. Удачное восстановление параметров петли получается только при наличии сильной питч-угловой анизотропии электронов с максимумом распределения, не равным 90° .

Для объяснения наблюдаемых во вспышке 19 июля 2012 г. поляризационных особенностей выполнено трехмерное моделирование микроволнового излучения вспышечной петли с применением расчета кинетики нетепловых электронов в магнитной ловушке. Моделирование проводилось на основе решения нестационарного кинетического уравнения в форме Фоккера-Планка, включающего функцию инжекции электронов и описывающего эффекты магнитного отражения и высыпания частиц, а также кулоновского рассеяния на фоновой плазме [1]. Используя полученную функцию распределения электронов по энергиям, питч-углам, расстоянию вдоль петли и времени, выполнялся расчет характеристик их гиротронного (ГС) излучения, используя методику и набор программ,

описанных в работе [24]. Вычисления проводились для модельной изогнутой петли конечной толщины на основе решения уравнения переноса излучения, учитывающего неоднородность распределения ускоренных электронов и тепловое тормозное излучение и поглощение. В соответствии с результатами исследования [21] были рассмотрены модели с инжекцией электронов в вершине вспянутой петли трех видов: с квазипродольным распределением электронов по питч-углам, квазипоперечным и изотропным. В результате установлено, что для модели с квазипродольной питч-угловой анизотропией инжектированных электронов реализуется пространственно-временное распределение поляризации излучения на частоте 17 ГГц, схожее с наблюдаемым в событии 19 июля 2012 г. Анализ модельных расчетов показал, что в вершине петли формируются квазипродольные пучки нетепловых электронов, излучение которых происходит в обыкновенной моде [11], что приводит к наблюдаемой инверсии поляризации.

Раздел 2.3 посвящен поиску других событий с признаками доминирования обыкновенной моды наблюдаемого микроволнового излучения. Для выполнения работы из общего каталога событий радиогелиографа Нобеляма, произошедших с 1998 по 2015 были отобрано около 40 вспышек, обладающих четкой петельной структурой с размером, значительно превышающим размер диаграммы направленности радиотелескопа (10" – 17 ГГц, 5" – 34 ГГц). Для данных событий были построены карты распределения радиояркости (на частотах 17 и 34 ГГц) и степени круговой поляризации (на 17 ГГц) с временным разрешением 1 с. На основе анализа радиокарт, а также данных о магнитном поле на уровне фотосферы, полученных космическими магнитографами SDO/HMI [35] и SOHO/MDI [34], был выполнен поиск событий, в которых присутствуют признаки преобладания обыкновенной моды наблюдаемого микроволнового излучения. Основным таким признаком является изменение знака наблюдаемой степени круговой поляризации со временем в какой-либо области петли. Помимо этого, в соответствии с полученными в разделе 2.2 результатами, рассматривались лимбовые события, в которых наблюдается пространственная инверсия знака поляризации в вершине относительно оснований петли. По результатам подобного анализа были отобраны следующие солнечные вспышки: 13 марта 2000 г., 23 января 2012 г., 28 октября 2013 г., 22 октября 2014 г. В разделе приводится описание основных особенностей каждого события и обнаруженных

признаков доминирования обыкновенной моды. На основе анализа временных профилей потоков и степени поляризации излучения на частотах 17 и 34 ГГц, а также показателя наклона спектра между ними приводятся рассуждения о причине преобладания обыкновенной моды излучения.

В разделе 2.4 приводятся основные результаты главы 2.

Глава 3 посвящена изучению природы суб-терагерцового излучения солнечных вспышек с положительным наклоном миллиметрового спектра в частотном диапазоне 93 – 140 ГГц. Материалы главы основаны на работах [41, 3, 29, 42, 30].

В разделе 3.1 говорится о явлении положительного наклона суб-ТГц спектра, впервые обнаруженного по данным наблюдений радиотелескопов SST [18] и KOSMA [22] в диапазоне 200 – 400 ГГц. Приводятся различные интерпретации данной спектральной особенности, основанные на специфических для солнечных вспышек механизмах излучения или нетипичных параметрах теплового или гиротронного источников [13]. Все эти модели сталкиваются с теми или иными трудностями при интерпретации и не могут быть до конца проверены на основе имеющихся наблюдений [13]. При этом, диапазон 100 – 200 ГГц был недоступен до 2012 года, когда начал свою работу радиотелескоп РТ-7.5 МГТУ им. Баумана [37] на частотах 93 и 140 ГГц. Интересно, что по результатам наблюдений РТ-7.5 также обнаружены солнечные вспышки с положительным наклоном спектра между 93 и 140 ГГц. Третья глава диссертации посвящена изучению природы суб-ТГц всплесков в этих событиях на основе совместного анализа миллиметрового, сантиметрового, ультрафиолетового, мягкого и жесткого рентгеновского излучений по данным наземных и космических обсерваторий.

В разделе 3.2 дается описание трех солнечных вспышек: 4 июля 2012 г., 5 июля 2012 г. и 2 апреля 2017 г., в которых был зарегистрирован радиовсплеск на частотах 93 и 140 ГГц радиотелескопом МГТУ им. Баумана РТ-7.5. Данные события имеют рентгеновский класс по GOES выше M5 и наблюдались также сетью солнечных радиотелескопов RSTN (станция San Vito) в диапазоне 5 – 16 ГГц, ультрафиолетовым телескопом SDO/AIA, спутниками GOES, RHESSI и Konus-Wind в мягком и жестком рентгеновском диапазонах. Приводятся временные профили миллиметрового излучения, которые показывают, что для всех трех вспышек в течение всего всплеска

поток на 140 ГГц превосходит поток на 93 ГГц, т.е. наклон миллиметрового спектра – положительный.

Проводится сравнительный анализ сантиметрового, миллиметрового, мягкого и жесткого рентгеновского временных профилей. Максимум миллиметрового всплеска в событии 4 июля 2012 г. запаздывает на 20 сек относительно максимумов сантиметрового и жесткого рентгеновского излучений и совпадает с максимумом мягкого рентгеновского всплеска. Во вспышке 5 июля 2012 г. временное изменение миллиметровых потоков очень похоже на поведение сантиметрового и жесткого рентгеновского профилей, что указывает на нетепловой источник суб-ТГц всплеска. Характер эволюции миллиметрового излучения во вспышке 2 апреля 2017 г. скорее согласуется с поведением мягкого рентгеновского излучения, полученного спутником GOES в каналах 1-8 и 0.5-4 А. Относительная гладкость миллиметрового профиля и отсутствие резких пиков, которые имеют место в сантиметровом и жестком рентгеновском диапазонах, говорят в пользу тепловой природы всплеска на частотах 93 и 140 ГГц в этом событии.

Раздел 3.3 посвящен интерпретации положительного наклона спектра между частотами 93 и 140 ГГц в солнечных вспышках 4 июля 2012 г., 5 июля 2012 г. и 2 апреля 2017 г. С этой целью проведено восстановление дифференциальной меры эмиссии тепловой плазмы в диапазоне температур 0.3-30 МК на основе данных наблюдений телескопа SDO/AIA в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) излучении (в каналах 93, 131, 171, 193, 211 и 335 А) и выполнен расчет потоков ее теплового тормозного излучения в микроволновом диапазоне. Установлено, что вклад тепловой плазмы с температурой 0.5-20 МК в миллиметровое излучение исследуемых вспышек незначителен и не может приводить к наблюдаемому росту спектра между частотами 93 и 140 ГГц.

В разделе отмечается, что схожесть сантиметрового и миллиметрового временных профилей в событии 5 июля 2012 г. говорит о том, что суб-ТГц излучение вспышки может генерироваться нетепловыми электронами за счет гиротронного механизма. На основе процедуры фитирования жестких рентгеновских спектров, полученных телескопом RHESSI, и предположения о единой популяции низкоэнергичных ($E < 300$ кэВ) и высокоэнергичных ($E > 300$ кэВ) электронов, в разделе 3.3 выполнены оценки их концентрации. Выдвинуто

предположение, что положительный наклон спектра электронного ГС излучения между частотами 93 и 140 ГГц может формироваться за счет теплового тормозного поглощения в фоновой плазме, если источник находится в области хромосферы или переходной области. Показано, что расчетное ГС излучение электронов с концентрацией, оцененной из рентгеновских наблюдений, хорошо согласуется с наблюдаемым на частотах 93 и 140 ГГц, если показатель спектра нетепловых электронов лежит в пределах от 2 до 2.6, толщина источника – от 3×10^7 до 10^8 см, концентрация фоновой плазмы – от 5.5×10^{10} до 10^{12} см⁻³, температура – от 10^4 до 3×10^5 К.

В разделе 3.4 для объяснения наблюдаемых в событиях 4 и 5 июля 2012 г. микроволновых спектров проведено трехмерное моделирование ГС излучения вспышечной петли. Задача данного раздела – получить физически реализуемые пространственные распределения параметров нетепловых электронов, магнитного поля и тепловой плазмы в магнитной арке, при которых ее полный радиоспектр имеет локальный максимум в сантиметровом диапазоне и положительный наклон в миллиметровом. В результате моделирования получена следующая конфигурация вспышечной петли. Магнитное поле меняется от 900 Гс в основаниях до 150 Гс в вершине. Основания петли находятся в плазме с хромосферными параметрами: температурой $T=10^4$ К и плотностью $n_e=2 \times 10^{11}$ см⁻³, а остальная ее часть – в корональной плазме ($T=10^6$ К, $n_e=10^{10}$ см⁻³). Концентрация нетепловых электронов спадает от 5×10^7 см⁻³ в основаниях до 5×10^6 в вершине петли. Показатель их энергетического спектра всюду равен 2.5. В модели также задана питч-угловая анизотропия нетепловых электронов – квазипоперечная в основаниях и квазипродольная в вершине. Важной особенностью модели является наклон оснований магнитной петли на угол около 70° к поверхности Солнца. Спектр полного микроволнового излучения модельной вспышечной петли имеет локальный максимум в районе 10 ГГц и положительный наклон между частотами 93 и 140 ГГц (рабочими частотами радиотелескопа РТ-7.5). При этом, излучение в миллиметровом диапазоне генерируется, главным образом, в основаниях петли, лежащих в хромосфере, а в сантиметровом – в ее корональной части.

В разделе 3.5 изучена возможность генерации всплеска на частотах 93 и 140 ГГц во вспышках 4 июля 2012 г. и 2 апреля 2017 г. вспышечной плазмой из области

хромосферы. Выполнен расчет теплового тормозного излучения вспышечной плазмы для полуэмпирических моделей солнечной атмосферы [23] и [43] в случае слабой и сильной вспышек, используя оценки площадей источника по картам жесткого рентгеновского излучения (RHESSI). Получено, что излучение вспышечной хромосферы на частотах 93 и 140 ГГц превышает уровень спокойного Солнца в 10 - 15 раз для модели сильной вспышки [23], имея при этом положительный наклон спектра. Сравнение с данными наблюдений показало, что потоки излучения хромосферы для модели сильной вспышки хорошо согласуются с максимальными потоками на частотах 93 и 140 ГГц в событии 4 июля 2012 г., но значительно ниже зарегистрированных во вспышке 2 апреля 2017 г. Как следует из расчетов, миллиметровое излучение хромосферных моделей формируется в геометрически тонком слое с температурой порядка 10^5 К, толщина которой не превышает десяти километров. Было показано, что объяснить наблюдаемые в событии 2 апреля 2017 г. максимальные потоки на частотах 93 и 140 ГГц можно лишь в том случае, если прослойка хромосферной плазмы является более плотной и горячей, нежели полученная из модели Мачадо [23].

В разделе 3.6 приводятся основные результаты третьей главы диссертации.

В **заключении** представлены главные результаты всей диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые в радионаблюдениях солнечных вспышечных петель обнаружена инверсия знака круговой поляризации микроволнового излучения вдоль вспышечной петли от оснований к вершине. В ходе теоретического моделирования кинетики энергичных электронов в солнечной магнитной ловушке и расчета характеристик ГС радиоизлучения, генерируемого энергичными электронами, установлено, что в вершине петли знак поляризации соответствует обыкновенной моде, а наблюдаемая смена знака поляризации может быть обусловлена продольным характером пичч-угловой анизотропии ускоренных электронов в верхней части вспышечной петли.
2. Впервые по данным радиогелиографа Нобейма применен метод прямой подгонки для восстановления четырех параметров вспышечных петель (концентрации и показателя энергетического спектра нетепловых электронов, напряженности и

направления линий магнитного поля) в событии 19 июля 2012 г. На основании результатов восстановления предложена интерпретация наблюдаемого изменения степени поляризации вдоль петли, связанная с реализацией во вспышке анизотропии нетепловых электронов типа гауссова пучка.

3. Обнаружено, что в шести из сорока солнечных вспышках из базы данных радиогелиографа Нобеяма присутствует пространственная и временная инверсия степени поляризации микроволнового излучения на частоте 17 ГГц. Показано, что в четырех событиях в некоторых частях петли присутствует доминирование обыкновенной моды микроволнового излучения.
4. На основе оригинальных наземных (PT-7.5) и космических (SDO, RHESSI, GOES) наблюдений в суб-терагерцовом (93-140 ГГц), ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, показано, что растущий с частотой поток миллиметрового излучения солнечной вспышки 4 июля 2012 г. связан с оптически толстым тепловым тормозным источником, расположенным в переходной области Солнца.
5. Показано, что наблюдаемый в событии 5 июля 2012 г. микроволновый спектр, имеющий максимум в районе 10 ГГц и положительный наклон между частотами 93 и 140 ГГц, может быть объяснен гиротронным излучением нетепловых электронов магнитной петли, основания которой наклонены на угол около 70° . При этом низкочастотная компонента генерируется преимущественно в ее корональной части, а высокочастотная – в основаниях петли, лежащих в хромосфере.
6. Изучена возможность генерации всплеска на частотах 93 и 140 ГГц в хромосфере Солнца для нескольких вспышек. Выполнен расчет теплового тормозного излучения плазмы для полуэмпирических моделей солнечной атмосферы [23] в случае слабой и сильной вспышек, используя оценки площадей источника по картам жесткого рентгеновского излучения (RHESSI). Получено, что потоки излучения хромосферы для модели сильной вспышки согласуются с максимальными потоками на частотах 93 и 140 ГГц в событии 4 июля 2012 г.
7. Проведен анализ вклада теплового тормозного излучения вспышечной плазмы в микроволновое излучение солнечных вспышечных петель по данным радиогелиографа Нобеяма и спутников GOES. Установлено, что на фазах роста и максимума всплеска влияние тепловой плазмы на общий поток и спектральный индекс микроволнового излучения незначительно, а на фазе спада становится

существенным, приводя к весоному изменению наблюдаемого микроволнового спектра.

Цитированная литература

- [1] Горбиков С.П., Мельников В.Ф. Численное решение уравнения Фоккера-Планка в задачах моделирования распределения частиц в солнечных магнитных ловушках // Математическое моделирование. – 2007. – Т.19. – №2. – С.112-122.
- [2] Мельников В.Ф., Коста Ж.Э.Р., Симоес П.Ж.А. Суб-ТГц излучение солнечных вспышек: формирование спектра // Сборник трудов XV ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2011». – 2011. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.159-162.
- [3] Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В., Моргачев А.С., Моторина Г.Г., Рыжов В.С., Жаркова Н.А., Нагнибеда В.Г. Анализ механизмов генерации излучения рентгеновского, микроволнового и миллиметрового диапазонов в плазме солнечной вспышки 5 июля 2012 г. // Наука и Образование. – 2016. – №12. – С.85-97.
- [4] Alisandrakis C.E., Nindos A., Kundu M.R. Evidence for ordinary mode emission from microwave burst // Solar Phys. – 1993. – V.147. – P.343–358.
- [5] Altyntsev A.T., Fleishman G.D., Huang G.L., Melnikov V.F. A broadband microwave burst produced by electron beams // Astrophys. J. – 2008. – V.677. – P.1367–1377.
- [6] Aschwanden M.J., Benz A.O. Electron densities in solar flare loops, chromospheric evaporation upflows, and acceleration sites // Astrophys. J. – 1997. – V.480. – №2. – P.825-839.
- [7] Bastian T.S., Benz A.O., Gary D.E., Radio emission from solar flares // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1998. – V. 36. – P.131-188.
- [8] Cohen M.H. Magnetoionic mode coupling at high frequencies // Astrophys. J. – 1960. – V.131. – P.664-680.
- [9] Correia E., Kaufmann P., Magun A. The observed spectrum of solar burst continuum emission in the submillimeter spectral range // Proceedings of IAU Symposium. – 1994. – P.125-129.
- [10] Dulk G.A., Radio emission from the Sun and stars // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1985. – V.23. – P.169-224.
- [11] Fleishman G.D., Melnikov V.F. Gyrosynchrotron emission from electrons with anisotropic pitch-angle distribution // Astrophys. J. – 2003. – V.587. – P.823-835.
- [12] Fleishman G.D., Nita G.M., Gary D.E. Dynamic magnetography of solar flaring loops // Astrophys. J. – 2009. V.698. – №2. – P.L183-L187.
- [13] Fleishman G.D., Kontar E.P. Sub-THz radiation mechanisms in solar flares // Astrophys. J. Lett. – 2010. – V.709. – №2. – P.L127-L132.
- [14] Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // Astrophys. J. Lett. – 2010. – V.721. – №2. – P.1127-1141.
- [15] Fleishman G., Altyntsev A., Meshalkina N., Microwave signature of relativistic positrons in solar flares // Publ. Astron. Soc. Jpn. – 2013. – V.65. – №S7. – P.1-5.
- [16] Gary D.E., Fleishman G.D., Nita G.M. Magnetography of solar flaring loops with microwave imaging spectropolarimetry // Solar Phys. – 2013. – V.288. – №2. – P.549-565.
- [17] Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R., Zodivaz A.M. A synchrotron/inverse Compton interpretation of a solar burst producing fast pulses at lambda less than 3-mm and hard X-rays // Astron. Astrophys. – 1986. – V.157. – №1. – P.11-18.

- [18] Kaufmann P., Raulin J.-P., Correia E. et al. Solar flare observations at submm-waves // Proceedings of IAU Symp. «Recent Insights into the Physics of the Sun and Heliosphere: Highlights from SOHO and Other Space Mission». – 2001. – ASP, San Francisco. – P.283-286.
- [19] Kaufmann P., Trotter G., Gimenez de Castro C.G. Subterahertz, microwaves and high energy emissions during the 6 December 2006 flare, at 18:40 UT // Solar Phys. – 2009. – V.255. – P.131-142.
- [20] Kundu M.R., Vlahos L. Solar microwave bursts — A review // Space Science Reviews. – 1982. – V.32. – №4. – P.405-462.
- [21] Liu W., Chen Q., Petrosian V. Plasmoid ejection and loop contraction in an eruptive M7.7 solar flare: Evidence of particle acceleration and heating in magnetic reconnection outflows // Astrophys. J. – 2013. – V.767. – №2. – id.168. – 18 p.
- [22] Luthi T., Magun A., Miller M., First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // Astron. Astrophys. – 2004. – V.415. – P.1123-1132.
- [23] Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., Noyes R.W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // Astrophys. J. – Pt.1. – 1980. – V.242. – P.336-351.
- [24] Melnikov V.F., Pyatakov N.P., Shibasaki K. Constraints for electron acceleration models in solar flares from microwave observations with high spatial resolution // Proceedings of the 3rd Hinode Science Meeting. – 2009., ASP Conf. Ser. 454, San Francisco: Astronomical. Soc. Pac., 2012, P.321–324.
- [25] Morgachev A.S., Polyakov V.E., Melnikov V.F. Contribution of thermal bremsstrahlung to microwave emission of solar flare loops // Astronomy Reports. – 2014. – V.58. – №5. – P.335-344.
- [26] Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. Radio diagnostics of the solar flaring loop parameters by direct fitting method // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – V.54. – №7. – P.933-942.
- [27] Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F., Simoes J.A. Modeling the distribution of circular polarization degree of solar flare loops in event 19 July 2012 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2015. – V.55. – №8. – P.1118–1123.
- [28] Morgachev A.S., Melnikov V.F., Kuznetsov S.A. Search for accelerated electron anisotropy signatures based on observed polarization of the flaring loop microwave emission // Geomagnetism and Aeronomy. – 2016. – V.56. – №8. – P.1045-1052.
- [29] Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V. et al. Simulation of microwave emission from the magnetic arch with a growing millimeter spectrum // Geomagnetism and Aeronomy. – 2017. – V.57. – №8. – P.1028-1038.
- [30] Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. Simulation of subterahertz emission from April 2, 2017 solar flare based on the multiwavelength observations // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – V.58. – №8. – P.1113-1122.
- [31] Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M. et al. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama // Astronomical Society of Japan Publications. – 1985. – V.37. – №1. – P.163-170.
- [32] Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama radioheliograph // In Proc. Of the IEEE. – 1994. – V.8. – P.705-713.
- [33] Raulin J.P., Makhmutov V.S., Kaufmann P. et al. Analysis of the impulsive phase of a solar flare at submillimeter wavelengths // Solar Phys. – 2004. – V.223. – P.181-199.
- [34] Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al. The solar oscillations investigation Michelson

- Doppler Imager // *Solar Phys.* – 1995. – V.162. – P.129-188.
- [35] Scherrer P.H., Schon J., Bush R.I. et al. The helioseismic and magnetic imager (HMI) investigation for the Solar Dynamic Observatory // *Solar Phys.* – 2012. – V.75. – P.207-227.
- [36] Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., et al. Evidence that synchrotron emission from nonthermal electrons produces the increasing submillimeter spectral component in solar flares // *Solar Phys.* – 2007. – V.245. – P.311-326.
- [37] Smirnova V.V., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S. et al. Observations of subterahertz radiation of solar flares with an RT-7.5 radiotelescope // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2013. – V.53. – P.997-999.
- [38] Su Y.N., Huang G.L. Polarization of loop-top and footpoint sources in microwave bursts // *Astrophys. J.* – 2004. – V.219. – P.159-168.
- [39] Thomas R.J., Starr R., Crannell C.J. Expressions to determine temperatures and emission measures for solar X-ray events from GOES measurements // *Solar Phys.* – 1985. – V.95. – №2. – P.323-329.
- [40] Trotter G., Raulin J., Kaufmann P., et al. First detection of the impulsive and extended phases of a solar radio burst above 200 GHz // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V.381. – P.694-702.
- [41] Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S. et al. On the origin of the sub-THz emission from the 4 July 2012 solar flare // *Advances in Space Research.* – 2016. – V.57. – №7. – P.1449-1455.
- [42] Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G. et al. Millimeter and X-ray emission from the 5 July 2012 solar flare // *Solar Phys.* – 2018. – V.293. – №3. – id.50. – 15 p.
- [43] Qu Z.Q., Xu Z. Key properties of solar chromospheric line formation process // *Chinese Journal of Astronomy & Astrophysics.* – 2002. – V.2. – P.71-80.
- [44] Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Melnikov V.F. Sub-terahertz emission from solar flares: The plasma mechanism of chromospheric emission // *Astronomy Letters.* – 2013. – V.39. – №9. – P.650-659.
- [45] Zharkova V.V., Arzner K., Benz A.O. et al. Recent advances in understanding particle acceleration processes in solar flares // *Space Sci. Rev.* – 2011. – V.159. – №1-4. – P.357-420.