

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

УДК 523.97

*На правах рукописи*

**Кудрявцева Анастасия Витальевна**



**ИССЛЕДОВАНИЕ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СПОКОЙНОЙ И ВОЗМУЩЕННОЙ  
СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Специальность 1.3.1 – физика космоса, астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Просовецкий Дмитрий Владимирович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

**Мягкова Ирина Николаевна**, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (НИИЯФ МГУ), старший научный сотрудник Отдела космических наук.

**Соловьев Александр Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, заведующий лабораторией физики Солнца.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН».

Защита состоится « 23 » \_\_\_\_\_ января \_\_\_\_\_ 2024 г. в 09 часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://www.iszf.irk.ru> и в библиотеке ИСЗФ СО РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.197.01

кандидат физико-математических наук



Ясюкевич Ю.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития методов прогнозирования эруптивных процессов на Солнце, которые могут оказывать воздействие на околоземное космическое пространство, магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли, а также на деятельность человека. Солнце представляет собой комплексную систему, генерирующую магнитные поля сложной конфигурации, в которой наблюдаются магнитогидродинамические волновые процессы, формируются области с повышенным магнитным полем и осуществляется перенос энергии из нижних слоев солнечной атмосферы в корону. С солнечной поверхности непрерывно истекает плазма, образуя солнечный ветер (СВ), заполняющий Солнечную систему, и оказывая влияние на магнитосферы планет, в том числе формируя космическую погоду на Земле. СВ является основным фактором, непрерывно воздействующим на околоземное космическое пространство, характеристики которого, в свою очередь, определяются параметрами солнечной атмосферы и транзиентными явлениями, такими как корональные выбросы массы (КВМ) и вспышки. Для совершенствования методов прогнозирования воздействия на Землю и деятельность человека происходящих на Солнце процессов необходимо получение своевременных сведений о структуре активных областей (АО) и СВ, что является одной из главных задач физики Солнца. Ввод в эксплуатацию новых инструментов с достаточным для отслеживания быстротекающих процессов временным и пространственным разрешением, а также расширение диапазона наблюдений позволяют успешно решать эти задачи.

Одной из фундаментальных проблем физики Солнца является решение проблемы нагрева солнечной короны и ускорения частиц, которая остается нерешенной многие годы, несмотря на развитие разнообразных теорий, появление новых наблюдательных данных и развитие численных методов моделирования на их основе. Именно в короне Солнца происходят процессы, определяющие космическую погоду – вспышки, КВМ и формирование высокоскоростных потоков СВ. Разностороннее и комплексное изучение этих явлений значительно улучшило понимание процессов солнечной активности (СА), происходящих в солнечной атмосфере, хотя многие аспекты остаются до сих пор неясными. Поэтому изучение свойств плазмы в АО и условий высвобождения энергии является важной составляющей современной солнечной физики, а исследование законов, по которым меняются характеристики СВ, позволяет разрабатывать новые модели, предсказывающие свойства СВ на орбите Земли.

Эра внеатмосферных космических обсерваторий открыла новые возможности для изучения строения и динамики солнечной атмосферы. Полученные изображения солнечной короны позволили детальнее увидеть и изучить структуру таких ее элементов, как корональные петли, стримеры, полярные щеточки и КВМ, а также получить больше информации о процессах энерговыделения. Наблюдения в различных диапазонах излучения (белом свете, крайнем ультрафиолетовом (КУФ) и рентгеновском) показали структуру солнечной атмосферы на разных высотах от фотосферы до короны на расстояниях в десятки солнечных радиусов. Получили развитие теории СВ, установившие взаимосвязь между его параметрами и различными структурами солнечной короны: корональными дырами (КД) и стримерами. Появившиеся наблюдательные возможности способствовали появлению новых направлений исследований, таких как корональная гелиосейсмология, и обнаружению новых явлений: корональных дождей, диммингов, джетов и др.

Помимо СВ, на космическую погоду оказывают влияние солнечные вспышки – наиболее сильные и сложные явления в солнечной атмосфере наряду с КВМ. Возникают вспышки в АО, которые представляют собой сложную структуру, состоящую из участков магнитного поля противоположной полярности, достигающих значений в тысячи гаусс. Изучение пространственной структуры АО, ее формирования и эволюции позволяет оценить вероятность возникновения вспышки и предполагаемое воздействие на магнитосферу Земли. Однако до сих пор процессы преобразования и выделения энергии во время вспышек не поняты до конца. Особый вклад в понимание этих явлений все больше и больше вносят космические наблюдения в рентгеновском диапазоне и наземные наблюдения в радиодиапазоне – от метрового до субтерагерцового. Отдельно стоит выделить излучение в микроволновом диапазоне, позволяющее выявить процессы и явления, недоступные для обнаружения в других диапазонах, например, появление ускоренных электронов на ранних стадиях эволюции вспышки, возникновение квазистационарных радиоисточников над линией инверсии магнитного поля и др.

Особенностью некоторых АО является наличие квазистационарного радиоисточника, расположенного над линией инверсии радиальной компоненты магнитного поля, впервые обнаруженного Kundu [Kundu et al., 1977] и названного Neutral Line associated Sources. Дальнейшее их исследование по наблюдениям на частоте 5.7 ГГц на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) [Уралов и др., 1996], Радиогелиографе Нобейма на частоте 17 ГГц и РАТАН-600 [см., например, Abramov-Maximov et al., 2015] выявили ряд интересных свойств таких радиоисточников. Источники над нейтральной

линией (ИНЛ) появляются обычно за 1–2 дня до вспышки в местах наибольшего сближения солнечных пятен противоположной полярности и являются главными источниками микроволнового излучения АО. Появляются они преимущественно в АО со сложной конфигурацией, в которых происходит столкновение всплывающих магнитных потоков друг с другом и шировые движения, что приводит к увеличению напряженности магнитного поля. Установлено, что в структуре АО, породивших вспышки рентгеновского класса X, наблюдаются ИНЛ с излучением на высоких частотах, например, на 17 ГГц [Stewart et al., 1995; Uralov et al., 2008]. Предполагается, что наблюдение за излучением АО в микроволновом диапазоне и анализ эволюции магнитных полей для заблаговременного определения формирования ИНЛ может использоваться как определяющий фактор для прогноза сильных солнечных вспышек.

Еще одной актуальной задачей физики Солнца, связанной со вспышками, является изучение механизмов распространения энергии в широком диапазоне высот в солнечной атмосфере. Одним из инструментов, способных помочь в их изучении, является анализ квазипериодических пульсаций (КПП) – вариаций потока излучения по гармоническому или близкому к нему закону, которые наблюдаются в различных диапазонах и на разных фазах вспышек [Van Doorsselaere et al., 2016; Куприянова и др., 2020]. При наличии КПП временной профиль сигнала может иметь такие особенности: затухающие осцилляции, смещение периода, модуляции по частоте или амплитуде, треугольную форму сигнала и т.д. Причиной возникновения подобных особенностей может быть как наложение излучения от нескольких источников, так и изменение параметров среды в области вспышки.

**Целью настоящей диссертационной работы** является получение новых знаний о динамике джетов в СВ и процессах в солнечных АО на предвспышечной и вспышечной стадиях развития. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Исследованы временные и пространственные характеристики джетов в потоках СВ из полярных областей короны Солнца.
2. Исследованы процессы формирования источника над нейтральной линией магнитного поля в геоэффективной активной области с использованием двумерных многоволновых наблюдений Сибирского радиогелиографа-48.
3. Выявлены источники и возможные механизмы генерации квазипериодических пульсаций во вспышечном событии.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Впервые выявлена северно-южная асимметрия джетов, наблюдаемых в белом свете, в полярных областях солнечной короны на расстояниях от 4 до 16 солнечных радиусов.
2. Впервые проведен анализ местоположения ИНЛ на частотах 4–8 ГГц в геоэффективной АО.
3. С использованием изображений в диапазоне 4–8 ГГц показана пространственная связь между петельными структурами разной высоты, объясняющая наличие общего источника возмущения для КПП, наблюдавшихся в разных спектральных диапазонах.

### **Научная и практическая значимость**

- Полученные результаты дополняют и углубляют знания о процессах энерговыделения, происходящих в солнечной короне. Использование многоволнового подхода к анализу вспышечных событий позволило разработать сценарий, объясняющий связь между колебаниями с различным периодом, одновременно наблюдавшихся в различных спектральных диапазонах.
- Обнаруженная северно–южная асимметрия в свойствах джетов может быть интерпретирована в рамках теории солнечного динамо как взаимодействие дипольных и квадрупольных мод.
- Результаты, полученные при изучении закономерностей распространения джетов, полезны в контексте их вклада в солнечный ветер.
- Подтверждена возможность прогнозирования мощных солнечных вспышек с использованием данных СРГ по наличию в АО источника над линией инверсии магнитного поля.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Обнаружение северно-южной асимметрии свойств джетов в потоках солнечного ветра, связанных с полярными областями.
2. По многоволновым двумерным наблюдениям Сибирского Радиогелиографа-48 в диапазоне 4–8 ГГц подтверждено существование источника радиоизлучения над линией инверсии магнитного поля перед серией мощных солнечных вспышек.

3. Установление связи вспышечного излучения в диапазоне 4–8 ГГц в низких петлях с высокой петельной структурой по синхронным наблюдениям Сибирского Радиогелиографа-48 и китайского радиогелиографа MUSER. Предложена гипотеза, объясняющая связь осцилляций, наблюдающихся в микроволновом и дециметровом диапазонах.

**Достоверность результатов** подтверждается их согласованностью с результатами других авторов, использующих иные наблюдательные данные, а также соответствием теоретическим моделям.

**Апробация работы.** Основные результаты и выводы диссертации публиковались в рецензируемых журналах, докладывались на научных семинарах ИСЗФ СО РАН и различных российских и международных конференциях:

- БШФФ-2013, **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. стендовый доклад "Исследование характеристик солнечного ветра по данным КА STEREO", Иркутск, Россия, 2013
- "Физика плазмы в солнечной системе-2015", **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. устный доклад "Исследование динамических и пространственных характеристик неоднородностей в солнечном ветре на расстояниях от 3.5 до 16 солнечных радиусов по данным КА STEREO", Москва, Россия, 2015
- RadioSun-4, **Kudryavtseva A.**, Prosovetsky D. устный доклад "Comparative characteristics of the solar wind streams in polar and low-latitude regions of the outer solar corona", Иркутск, Россия, 2015
- XIVth Hvar Astrophysical Colloquium, **Kudriavtseva A.V.**, Prosovetsky D.V. устный доклад "Analyses of solar wind flows structure by white-light data and location of solar wind sources", Хвар, Хорватия, 2016
- VarSITI-2017, **Kudriavtseva A.V.**, Prosovetsky D.V. устный доклад "Solar wind characteristics in polar regions of the sun corona by stereo data during 2009–2014", Иркутск, Россия, 2017
- БШФФ-2017, **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. устный доклад "Корональные полярные джеты по данным STEREO в период с 2009 по 2014 г.", Иркутск, Россия, 2017
- International Workshop on "Eruptive energy release processes on the Sun and stars", **Kudriavtseva A.**, Prosovetsky D. устный доклад "An unexpected behavior of solar wind flows"; **Kudriavtseva A.**, Kupriyanova E., Kashapova L., Kolotkov D., Broomhall

А.М. устный доклад "Analysis of non-stationary properties of QPPs by Siberian Raioheliograph: steps and first results", Вейхай, Китай, 2019

- БШФФ-2019, **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. устный доклад "Источники мелкомасштабных неоднородностей солнечного ветра", Иркутск, Россия, 2019
- "Физика плазмы в солнечной системе-2021", **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. устный доклад "Мелкомасштабные неоднородности в солнечном ветре: наблюдения, характеристики, источники", Москва, Россия, 2021

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автор лично участвовал в обсуждении, постановке задач и принимал равное участие в интерпретации полученных результатов совместно с соавторами. Подготовка к публикации проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автор представлял устные и стендовые доклады на конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы из 147 наименований. Общий объем диссертации 102 страницы, включая 26 рисунков и 2 таблицы и Приложение.

### **Содержание работы**

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, раскрыта актуальность исследований, проведенных в данной диссертационной работе, сформулированы цель работы и поставленные задачи, охарактеризованы новизна и практическая значимость. В каждой главе приведен обзор литературы по соответствующему явлению СА.

**Первая глава** представляет исследование динамики распространения джетов в потоках СВ в солнечной короне по данным космических аппаратов (КА) STEREO и определения их возможных источников.

Структуру солнечной короны на изображениях, полученных в белом свете, можно описать как лучистую, т.е. состоящую из множества тонких лучей разной яркости. В ней можно выделить различные элементы: менее плотные полярные области, стримеры, на отдельных изображениях видны КВМ. Но, кроме этих структур, при просмотре последовательности изображений на фоне лучевой структуры видно множество мелких неоднородностей, удаляющихся от Солнца. На изображениях коронографов LASCO/SOHO [Brueckner et al., 1995] неоднократно отмечалось наличие

неоднородностей, не похожих по своим характеристикам и структуре на KBM [St Cyr et al., 1997; Wang and Sheeley Jr., 2002; Yu et al., 2014]. Устоявшегося термина для этого класса явлений на данный момент в литературе не существует, а в текстах зарубежных статей чаще всего используется термин "jet". Поэтому в диссертационной работе под плазменными неоднородностями или джетами подразумеваются неоднородности плазмы, наблюдаемые на изображениях солнечной короны в белом свете на расстояниях от 4 до 16 солнечных радиусов на всех гелиоширотах, от экваториальных до полярных областей. Джеты выглядят как узкие вытянутые сгустки вещества, более яркие на фоне окружающих потоков плазмы, но не имеющие четко выраженных границ или внутренней структуры и постепенно уменьшающие свою яркость по мере удаления от Солнца (рисунок 1).

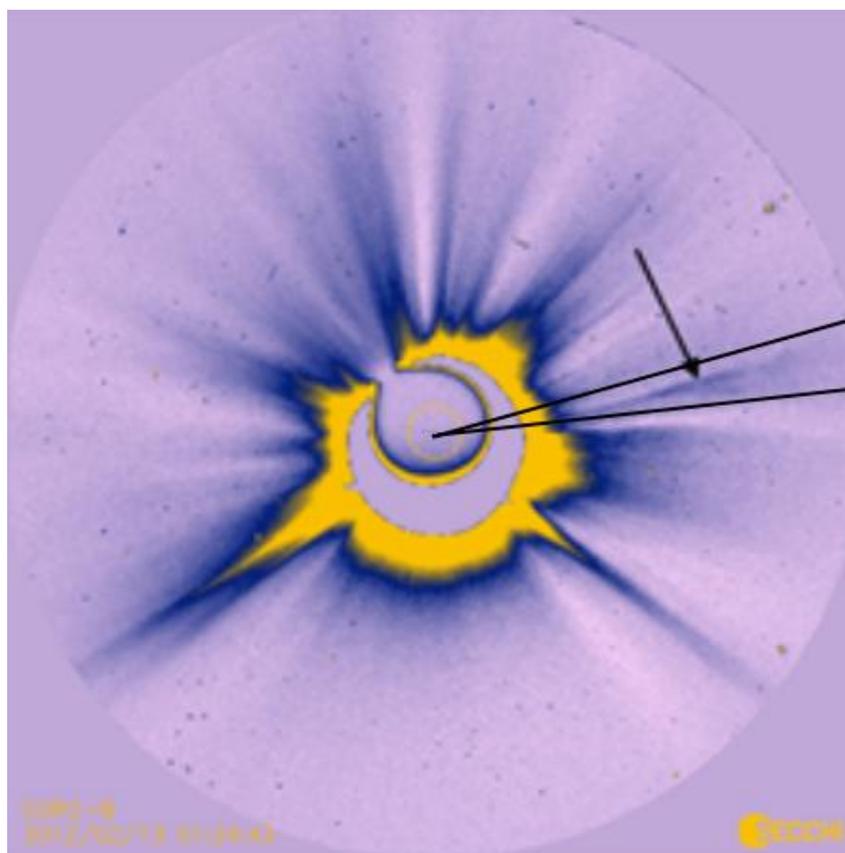


Рис. 1. Изображение солнечной короны, полученное КА STEREO в белом свете (негатив). Стрелкой в выделенном секторе обозначен пример джета.

В работе исследовались джеты, наблюдавшиеся с 2009 по 2014 год по данным коронографов COR2/STEREO в полярных областях солнечной короны. КА STEREO – Sun

Earth connection coronal and heliospheric investigation – двигаются вокруг Солнца с противоположных сторон навстречу друг другу на расстоянии примерно 1 а.е. [Howard et al., 2008]. Их данные при комбинации друг с другом или с данными других солнечных обсерваторий позволяют (при определенном расположении относительно друг друга) судить о трехмерной структуре различных формирований в солнечной короне. Корonoграф COR2 наблюдает солнечную корону в белом свете на расстояниях от 3.5 до 16 солнечных радиусов с временным разрешением 15 минут. Полярные области для исследования были выбраны как  $\pm 30^\circ$  от оси север–юг, проходящей через центр Солнца, что соответствует примерно  $60^\circ$  гелиошироты. Даты, в которые наблюдались КВМ, были исключены из рассмотрения с учетом каталогов SOHO и STEREO ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/); <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi.php>) для разделения джетов и КВМ.

Используемый в работе метод построения высотно-временных карт широко применяется для обнаружения перемещающихся корональных структур и определения их характеристик (см., например, [Sheeley et al., 1997, 1999]). Для увеличения контрастности плохо различимых джетов предварительно были построены разностные изображения, когда из каждого последующего кадра вычитается предыдущий, а затем сформированы высотно-временные карты для дальнейшего анализа. В работе проанализированы такие характеристики джетов, как частота появления и проекции скоростей на картинную плоскость. Полученные результаты сопоставлены с ходом цикла солнечной активности (СА). Обнаружена асимметрия в количестве наблюдаемых в течение года джетов над северным и южным полюсом, которое изменялось с течением времени (рисунок 2). Наблюдаемые два максимума в распределении количества джетов в различных полушариях (в 2011 году для северного полюса и в 2014 для южного) согласуются с двойным пиком максимума цикла СА, связанного с неодновременной сменой знака полярного магнитного поля (см., например, [Golubeva and Mordvinov, 2017]). Поэтому выдвинуто предположение о связи асимметрии джетов с инверсией знака магнитного поля на полюсах.

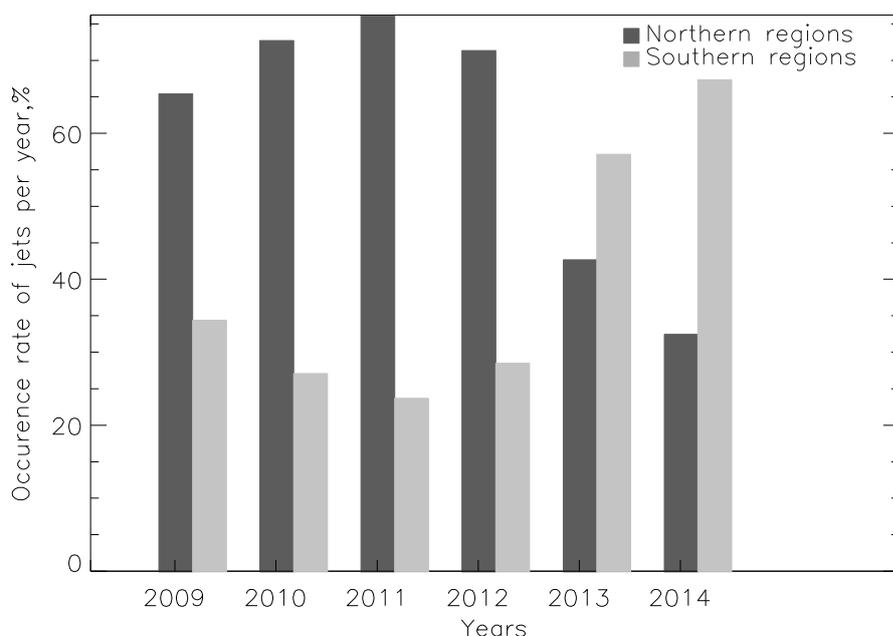


Рис. 2. Зафиксированное количество джетов над северным (темно-серый) и южным (светло-серый) полюсами за 2009–2014 гг.

Для анализа скоростей джетов определялись их проекции на картинную плоскость. Полученные результаты показали как различие в максимальных найденных значениях проекций скоростей между северным и южным полюсами, так и изменения в течение цикла СА. Рассмотрена возможная взаимосвязь размеров полярных КД и широтного распределения (в зависимости от угла между направлением распространения и осью север–юг) количества наблюдаемых джетов.

Отдельно была рассмотрена задача определения возможных источников джетов. Для этого использовались данные наблюдений отдельных джетов в низкоширотных областях солнечной короны. Использовались два подхода: расчет меры эмиссии и стереоскопия. В первом случае был выбран участок солнечной атмосферы, на котором присутствовала экваториальная КД, что свидетельствует о наличии открытой конфигурации линий магнитного поля, позволяющей джету удалиться на достаточное расстояние от поверхности Солнца. В пределах этого участка была рассчитана мера эмиссии для определения областей с наименьшей плотностью вещества, что свидетельствует о наиболее интенсивном выносе плазмы в межпланетное пространство. Такая область была найдена внутри КД, ближе к ее границе в КУФ-диапазоне на длине волны  $193 \text{ \AA}$ , которая соответствовала позиционному углу наблюдаемого коронографом COR2/STEREO джета.

Для реализации стереоскопического метода использовались данные наблюдений джетов в экваториальных областях одновременно с двух спутников с использованием пакета программ для обработки данных STEREO. Полученные в результате совмещения данных двух КА координаты на солнечной поверхности соответствовали также областям с наличием открытых силовых линий магнитного поля: веерные структуры и границы КД. Рассмотрена возможность формирования джетов в результате небольших магнитных пересоединений, схожих с наблюдаемыми процессами в АО после KBM [Song et al., 2012], и их перемещения на значительные расстояния от Солнца, благодаря наличию открытой компоненты магнитного поля.

Основной результат первой главы состоит в обнаруженной северно-южной асимметрии в свойствах джетов в высокоширотных областях солнечной короны. Выявлены закономерности изменения их характеристик с течением цикла СА.

Исследования, описанные во **второй** и **третьей** главах, связаны с одной и той же АО 12673, в сентябре 2017 года ставшей причиной множества вспышек М, четырех вспышек класса X, интенсивных протонных потоков и сильной магнитной бури. Вспышка X9.3 стала самой мощной в 24 цикле солнечной активности.

**Вторая глава** посвящена изучению источника над линией инверсии магнитного поля как предвестника мощных солнечных вспышек по многоволновым данным Сибирского радиогелиографа.

Макет Сибирского радиогелиографа (СРГ-48) представляет собой Т-образную решетку, наблюдающую Солнце на пяти частотах в диапазоне 4–8 ГГц с временным интервалом около 8 с и пространственным разрешением 70" на частоте 8 ГГц. Изменение солнечной активности отслеживается при помощи корреляционных кривых, представляющих изменения во времени суммы кросс-корреляций сигналов всех пар антенн. Таким образом, изменения графика корреляционных кривых отражают вариации яркости или структуры источников излучения [Лесовой, Кобец, 2017]. Чувствительность СРГ-48 достигает  $10^{-4}$  от полного потока спокойного Солнца, что позволяет отслеживать даже незначительные колебания в радиоизлучении. Из полученных данных на основе фурье-синтеза генерируются изображения в левой и правой компоненте круговой поляризации, и затем можно построить изображения в интенсивности и поляризации (параметры Стокса I и V соответственно).

Идентификация ИНЛ основана на сопоставлении микроволнового изображения АО и рассчитанной продольной составляющей фотосферного магнитного поля на

заданной высоте. На радиоизображениях в интенсивности центр яркости ИНЛ совпадает с областью максимума горизонтальной составляющей магнитного поля над нейтральной линией АО [Уралов и др., 2006; Uralov et al., 2006]. Ранее локализовать ИНЛ удавалось по изображениям ССРТ на 5.7 ГГц и данным Радиогелиографа Нобеяма на 17 и 34 ГГц [Nakajima et al., 1994; Vakunina et al., 2017]. С созданием нового инструмента СРГ-48 задача состояла в детектировании ИНЛ по двумерным многоволновым данным в диапазоне 4–8 ГГц и сравнении полученных результатов с данными Радиогелиографа Нобеяма.

Поскольку ввод в эксплуатацию СРГ-48 пришелся на конец 24 цикла СА, для анализа была доступна только одна АО – 12673. Для исследования использовались данные СРГ-48 на частотах 4.5, 5.2, 6.0, 6.8 и 7.5 ГГц и данные Радиогелиографа Нобеяма на 17 ГГц, а также магнитограммы SDO/HMI. Сопоставление радиокарт, полученных СРГ-48, с радиокартами Радиогелиографа Нобеяма показало их согласованность между собой как для интенсивности (параметр Стокса I), так и для поляризации (параметр Стокса V) (рисунок 3).

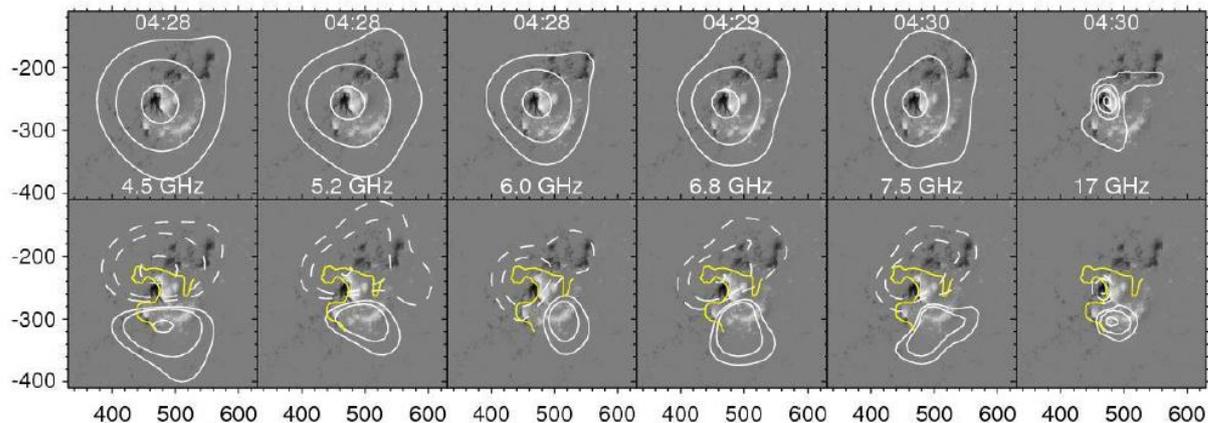


Рис. 3. NOAA 12673 6 сентября 2017 года. Параметры Стокса I (верхний ряд) и V (нижний ряд) по данным СРГ (4.5, 5.2, 6.0, 6.8 и 7.5 ГГц) и Радиогелиографа Нобеяма (17 ГГц). Фон – фотосферная продольная магнитограмма (04:30 UT; светлый – положительная полярность, темный – отрицательная). Контурсы в верхнем ряду – интенсивность. В нижнем ряду: белые сплошные контурсы – правая поляризация; белые штриховые – левая; желтые линии – нейтральная линия.

Для более корректного отождествления радиоисточника как ИНЛ необходимо не только сравнивать его положение относительно линии инверсии магнитного поля на уровне фотосферы, но и учитывать возможные проекционные эффекты. Для этого следует рассчитать корональное магнитное поле на той же высоте, на которой находится и источник радиоизлучения, и провести повторное сопоставление с радиокартами. Проведенный расчет показал, что максимум яркости радиоисточника действительно находится вблизи линии инверсии магнитного поля и совпадает с областью максимальных значений тангенциальной составляющей расчётного поля, что является признаком ИНЛ. Оценки положения радиоисточника относительно нейтральной линии магнитного поля показали одинаковые картины для 4, 5 и 6 сентября, что подтверждает продолжительное существование ИНЛ в АО на протяжении всего времени, когда наблюдались вспышки класса X.

В конце второй главы приведены выводы о возможности обнаружения ИНЛ по многоволновым данным SRG.

**Третья глава** посвящена многоволновому анализу квазипериодических пульсаций вспышки рентгеновского класса C6.9, произошедшей в проанализированной в предыдущей главе АО.

Многоволновые наблюдения повышают эффективность использования КПП для диагностики вспышечной плазмы. Сравнительный анализ излучения вспышки в нескольких диапазонах электромагнитного спектра дает уникальный материал, позволяющий определить места высвобождения и переноса энергии. Однако существуют некоторые трудности проведения такого анализа. Во-первых, наблюдения одновременно в нескольких спектральных диапазонах достаточно редки. Во-вторых, необходимо временное разрешение инструментов, достаточное для обнаружения колебаний с периодами меньше минуты. Событие рентгеновского класса C6.9, произошедшее в АО 12673 5 сентября 2017 года около 07:05 UT, предоставило уникальную возможность наблюдений КПП не только в микроволновом, но и в дециметровом диапазонах. Данное событие выглядело на данных в рентгеновском диапазоне как небольшое повышение излучения на спаде предыдущей вспышки M3.8, тем не менее показавшее признаки КПП сразу в двух диапазонах: микроволновом и дециметровом. В мягком рентгеновском диапазоне вспышка анализировалась по наблюдениям КА GOES в диапазоне 1–8 Å. Излучение в данном диапазоне формируется тепловыми механизмами. Для дециметрового диапазона использовались данные высокочастотной решетки MUSER-I Мингатунского спектрального радиогелиографа (MingantU SpEctral Radioheliograph – MUSER),

наблюдающей Солнце в диапазоне частот 0.4–2 ГГц с временным разрешением 25 мс [Yan, 2021].

В микроволновом диапазоне вспышка наблюдалась СРГ-48, упомянутым во второй главе, и Широкополосным микроволновым спектрополяриметром (BBMS) [Zhdanov and Zhdanov, 2011]. Его диапазон наблюдений составляет 3.8–8.2 ГГц, спектральное разрешение 16 частот и временное разрешение 0.6 с. Также использовались данные станции Learmonth, входящей в сеть Radio Solar Telescope Network (RSTN), получающую данные в диапазоне от 245 МГц до 15.4 ГГц с временным интервалом 1 секунда [Giersch, 2022].

Для получения изображений в КУФ-диапазоне были использованы данные Sun Watcher with Active Pixel System detector and Image Processing (SWAP)/PROBA2 [Seaton et al., 2013; Halain et al., 2013] на длине волны 174 Å с пространственным разрешением 3.16".

Временные профили излучения, зафиксированного этими инструментами, представлены на рисунке 4, и видно совпадение по времени максимумов микроволнового, дециметрового излучений и пика для производной мягкого рентгеновского излучения.

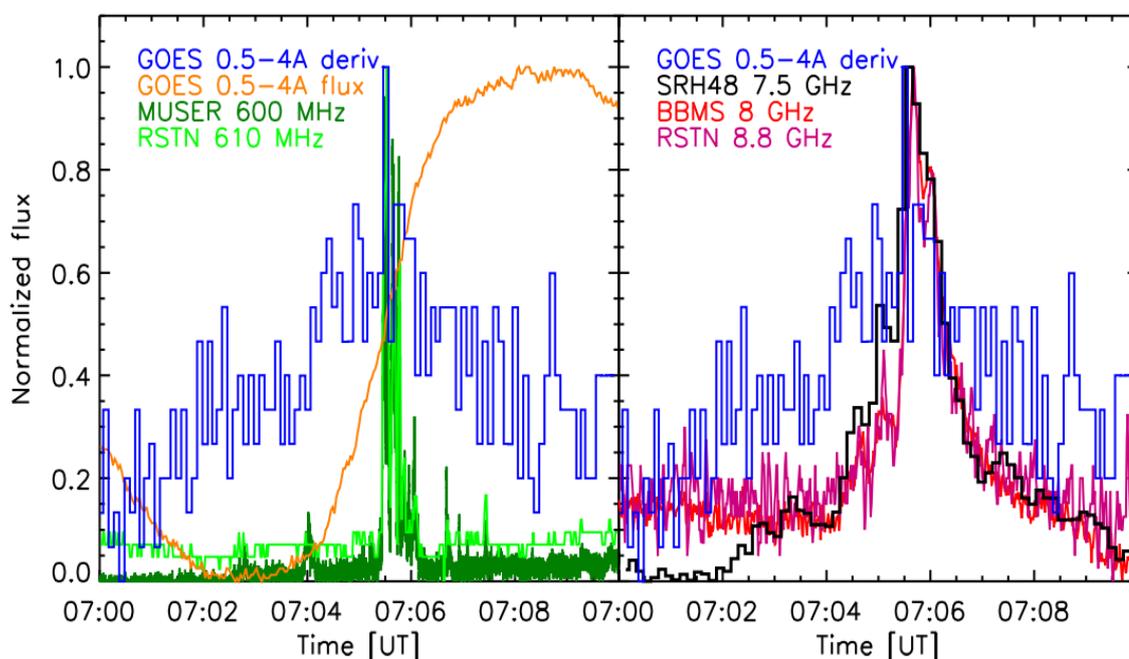


Рис. 4. Временные профили вспышки класса C6.9 5 сентября 2017 года, зафиксированные различными инструментами.

Присутствие ускоренных электронов в данном событии подтверждается наличием всплеска на временном профиле производной мягкого рентгеновского излучения (эффект Ньюперта [Neupert, 1968]). На рисунке 5 приведен пример наблюдаемых колебаний в микроволновом и дециметровом диапазонах.

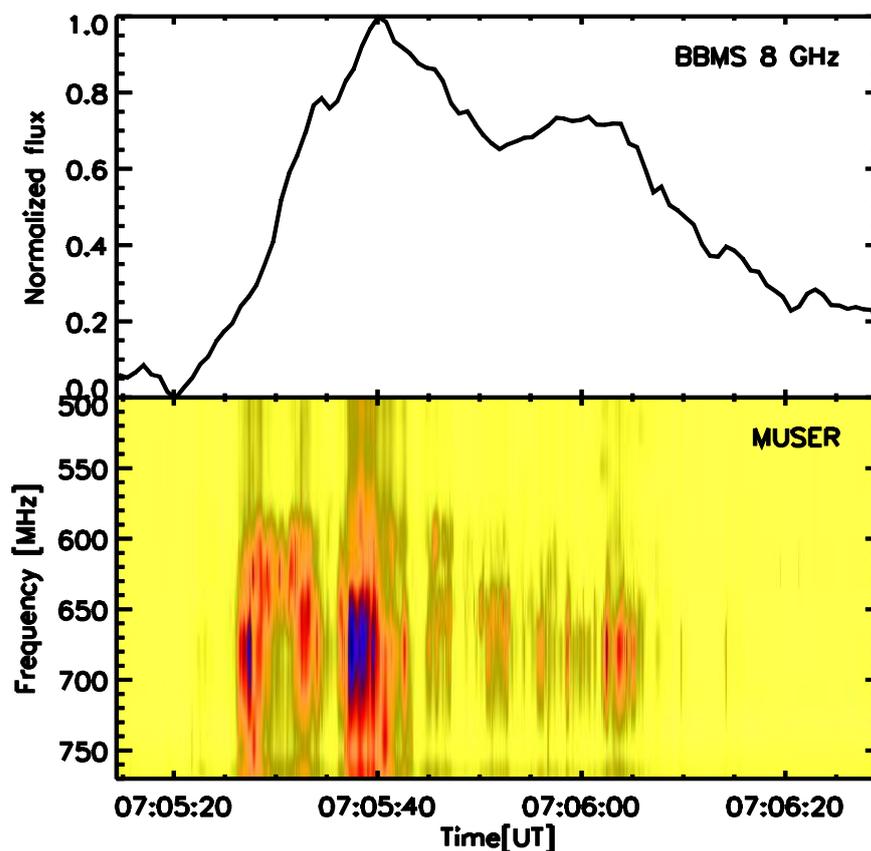


Рис. 5. Верхняя панель: временной профиль микроволнового изображения по данным инструмента BBMS на 8 ГГц; нижняя панель: динамический спектр по данным инструмента MUSER-I.

Спектр, полученный по данным MUSER для дециметрового диапазона, показывает узкие квазипериодические всплески, схожие с радиовсплесками I типа. Анализ параметра Стокса V показал, что все наблюдаемые радиовсплески поляризованы (а значит, излучение имеет нетепловую природу) и сохраняют свой знак на протяжении события. Наблюдаемая на частотах ниже 600 МГц инверсия поляризации с положительной на отрицательную свидетельствует, что излучение на этих частотах приходит из более высоких петель. На всех частотах от 500 до 700 МГц выявлены колебания с периодом

$6 \pm 1.5$  с, которые происходят в одной фазе (синфазны). В то же время в данных, полученных в микроволновом диапазоне, были выявлены колебания с периодом около  $30 \pm 5$  с.

С использованием данных MUSER, RSTN и BBMS был построен спектр излучения от 100 МГц до 20 ГГц (рисунок 6) для двух моментов времени, которые были выбраны исходя из максимума дециметрового излучения на 600 МГц и микроволнового излучения на 6.6 ГГц.

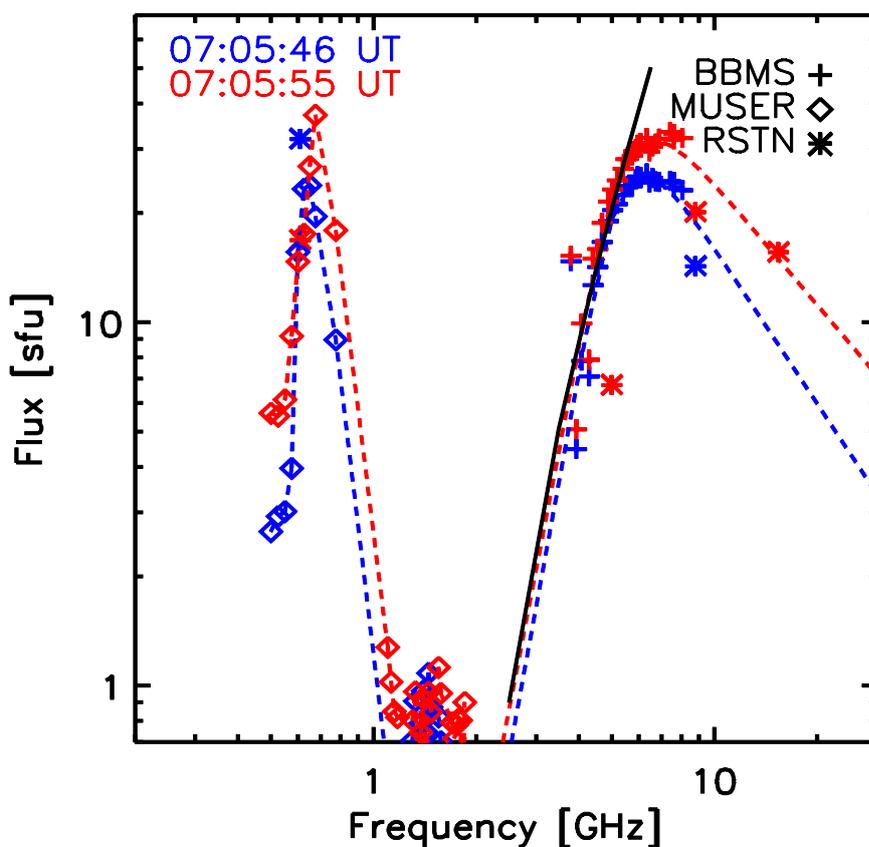


Рис. 6. Радиоспектр по данным MUSER, RSTN и BBMS. Красным цветом обозначен поток в 07:05:46 UT, что соответствует времени максимума дециметрового излучения, синим цветом – в 07:05:55 UT, что соответствует времени максимума микроволнового излучения, черным – аппроксимирующая функция.

Видно, что дециметровый спектр имеет узкую форму, характерную для плазменного излучения, в то время как спектр, построенный для микроволновой части, имеет типичную гиротронную форму. Частота спектрального максимума составляет около 6–7 ГГц, и можно сделать вывод, что источник микроволнового

излучения на частотах 4.5 и 5.4 ГГц является оптически толстым, а на частотах 6.8 и 7.5 ГГц – оптически тонким.

Как было сказано в предыдущей главе, АО 12673 имела хорошо развитую магнитную структуру с сильными магнитными полями и ИНЛ в своей структуре. Поэтому для исключения вклада постоянного излучения от квазистационарных источников (солнечного пятна и ИНЛ) применялась техника вычитания изображений, полученных в микроволновом диапазоне до вспышки, из изображений во время нее. Это позволило более четко локализовать области излучения во время вспышки на разных частотах и сопоставить их со структурами, наблюдаемыми в КУФ (рисунок 7).

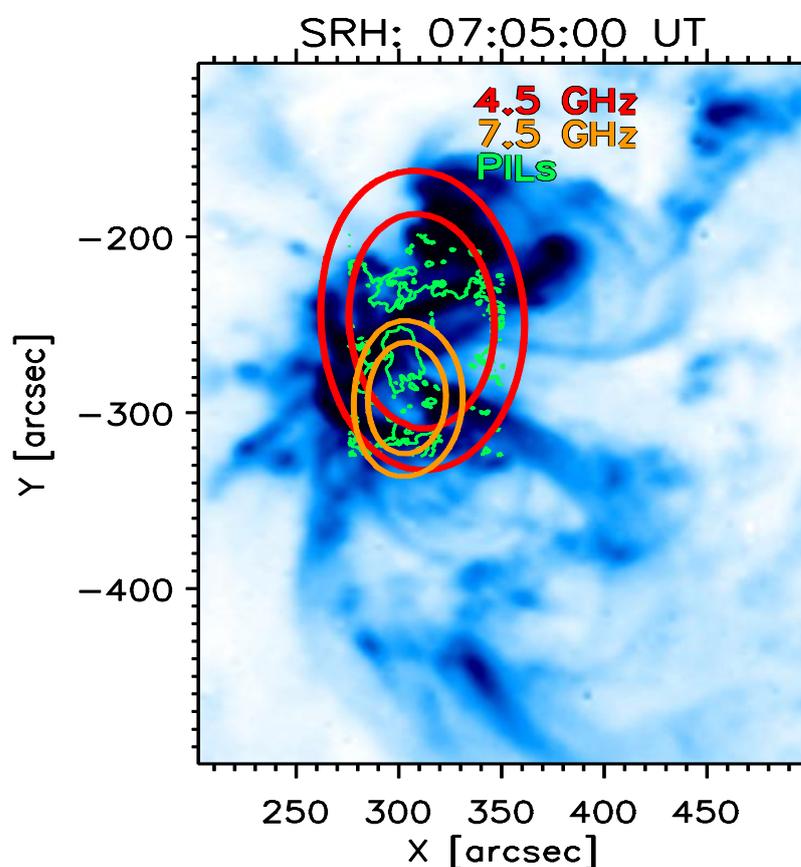
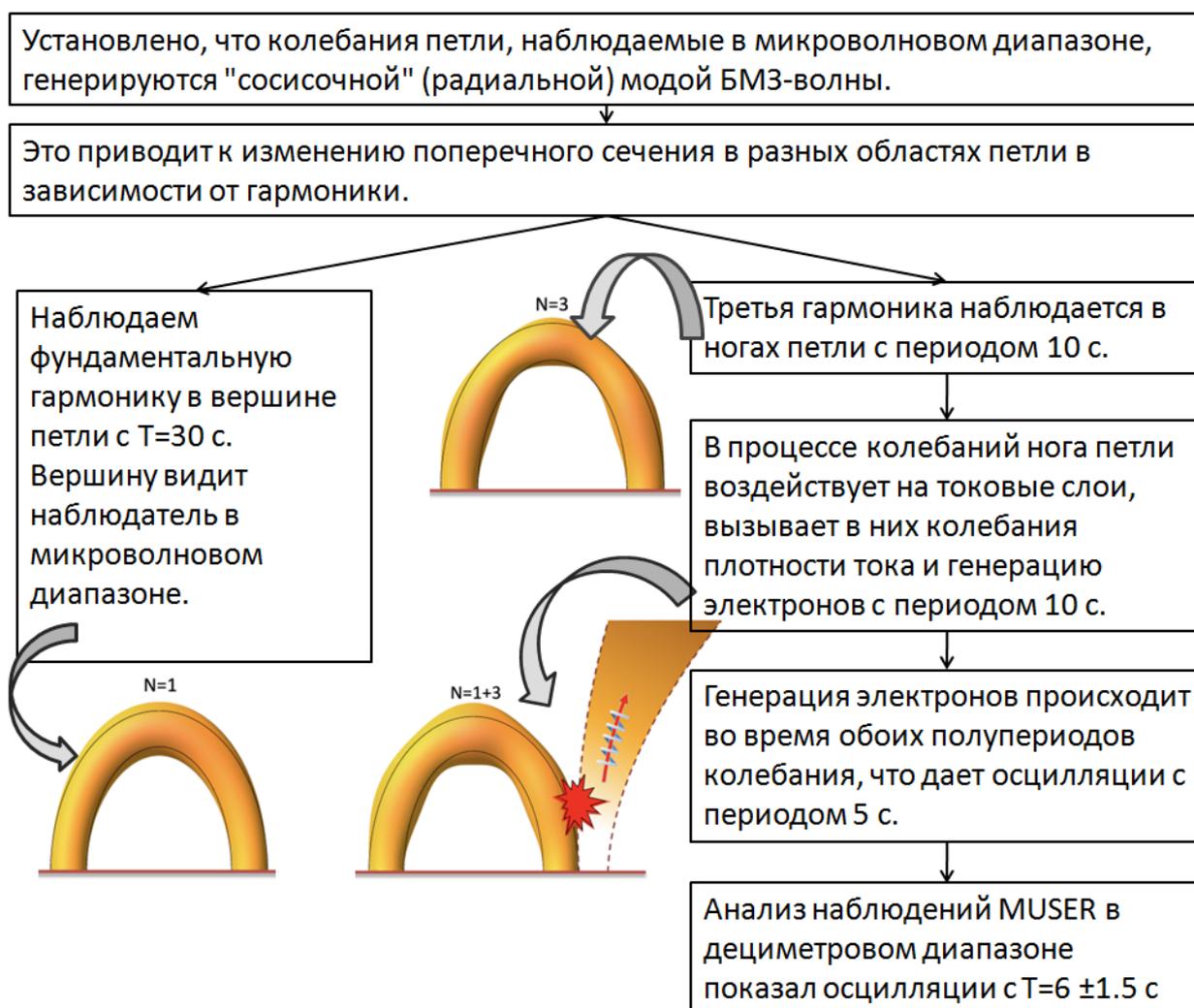


Рис. 7. Изображения, полученные PROBA2/SWAP на длине волны  $174 \text{ \AA}$ , с наложенными контурами микроволновых источников на 4.5 и 7.5 ГГц по данным SRG-48, зеленым обозначены линии инверсии полярности фотосферного магнитного поля.

Согласно совмещению изображений в микроволновом и КУФ-диапазонах, излучение на высоких частотах (7.5 ГГц, например) исходит из области вблизи основания

вспышечной петли, расположенной рядом с высокой петельной структурой. Именно эта высокая петельная структура может быть источником КПП в дециметровом диапазоне.

Выдвинуто предположение о причинах одновременного наблюдения КПП с разным периодом и в разных диапазонах в течение одного вспышечного события. Эволюция наблюдаемого гиротронного микроволнового спектра показала, что наблюдаемые КПП могут быть объяснены модуляцией излучения "сосисочной" моды. Сложная структура магнитного поля АО, в частности отражаемая наличием множества линий инверсии фотосферного магнитного поля в области вспышки, позволяет предположить наличие токовых слоев. Предложена схематическая модель, объясняющая одновременные наблюдения КПП в разных диапазонах:



В **Заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Выявлено различие количества и характеристик корональных полярных джетов на разных стадиях цикла СА, что можно интерпретировать в рамках теории солнечного динамо как взаимодействие дипольных и квадрупольных мод. Наблюдения предыдущих солнечных циклов показали, что смена знака магнитного поля не всегда происходит синхронно в северном и южном полушариях. В 24 цикле СА смена знака для южного полюса произошла в 2014–2015 гг., а для северного – к 2011–2012 гг. Изменение характеристик джетов совпадает на временных масштабах с моментами смены знака в полярных областях.
2. По результатам исследования сделано предположение, что изменения в угловом распределении джетов и наблюдаемых скоростях тесно связаны с условиями их формирования.
3. Впервые выявлено наличие ИНЛ в диапазоне 4–8 ГГц над линией инверсии магнитного поля в АО 12673 по двумерным многоволновым данным SRG-48. Показана возможность совместного использования многоволновых данных SRG и векторных магнитограмм для выявления ИНЛ с целью прогноза мощных солнечных вспышек.
4. Проведённый анализ расположения микроволновых вспышечных источников с использованием изображений, полученных в диапазоне 4–8 ГГц на SRG-48, показал их связь с высокой петельной структурой. Предложен сценарий, объясняющий взаимодействие между источником всплесков в дециметровом диапазоне и всплесками в микроволновом диапазоне.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций, 1 статья в нерецензируемом журнале, 4 в сборниках трудов конференции.

1. Kashapova L.K., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., **Kudriavtseva A.V.**, Tan C., Reid H. A. S. Common origin of quasi-periodic pulsations in microwave and decimetric solar radio bursts // *Solar Physics*. – 2021. – Vol. 296. – P. 185. – DOI:10.1007/s11207-021-01934-x
2. **Кудрявцева А.В.**, Мышьяков И.И., Уралов А.М., Гречнев В.В. Микроволновый индикатор потенциальной геоэффективности и жгутовая магнитная структура солнечной активной области // *Солнечно-земная физика*. – 2021. – Т. 7. – № 1. – Рр. 3–12. – DOI: 10.12737/szf-71202101

3. **Kudriavtseva A.V.**, Prosovetsky D.V. White-light polar jets on rising phase of solar cycle 24 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2019. – Vol. 193. – id.105039. – DOI:10.1016/j.jastp.2019.05.003.
4. **Kudriavtseva A.V.**, Prosovetsky D.V. Analyses of solar wind flows structure by white-light data and definition of solar wind sources // *Central European Astrophysical Bulletin*. – 2016. – Vol. 40, no. 1. – P. 123–131. – ISSN 1845–8319
5. **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. Источники мелкомасштабных неоднородностей солнечного ветра // *Сборник трудов БШФФ-2019*. – 2019. – С. 75–77.
6. **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. Корональные полярные джеты по данным STEREO в период с 2009 по 2014 г. // *Сборник трудов БШФФ-2017*. –2017. – С. 30–32.
7. **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. Источники мелкомасштабных неоднородностей в солнечном ветре и динамические параметры потоков солнечного ветра во внешней короне Солнца // *Сборник трудов БШФФ-2015*. –2019. – С. 33-35.
8. **Кудрявцева А.В.**, Просовецкий Д.В. Исследование характеристик солнечного ветра по данным КА STEREO // *Сборник трудов БШФФ-2013*. –2013. – С. 90–91.

### Список литературы

1. Алтынцев А.Т. Многоволновый Сибирский радиогелиограф / А.Т. Алтынцев, С.В. Лесовой, М.В. Глоба [и др.] // *Солнечно-земная физика*. – 2020. – Т.1, № 2. – С. 37–50.
2. Куприянова Е.Г. Квазипериодические пульсации в солнечных и звездных вспышках. Обзор. / Е.Г. Куприянова, Д.Ю. Колотков, В.М. Накаряков, А.С. Кауфман // *Солнечно-земная физика*. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 3–29.
3. Уралов А.М. Микроволновый источник над нейтральной линией как фактор прогноза крупных рентгеновских вспышек / А.М. Уралов, Р.А. Сыч, Б.И. Лубышев [и др.] // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. – Новосибирск: Наука, 1996. – Вып. 104. – С. 23–48.
4. Уралов А.М. Микроволновые источники над нейтральной линией: рождение, связь со вспышками и проекционный эффект / А.М. Уралов, Г.В. Руденко, И.Г. Руденко // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2006. – Т. 70, № 10. – С. 1475–1477.

5. Abramov-Maximov V.E. Dynamics of microwave sources associated with the neutral line and the magnetic-field parameters of sunspots as a factor in predicting large flares / V.E. Abramov-Maximov, V.N. Borovik, L.V. Opeikina, A.G. Tlatov // *Solar Physics*. – 2015. – Vol. 290, no. 1. – P. 53–77.
6. Bakunina I.A. Evolution of the compact microwave inter-sunspot source before strong flare / I.A. Bakunina, V.E. Abramov-Maximov, A.M. Osharin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 798, Iss. 1. – id. 012041.
7. Brueckner G.E. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). / G.E.Brueckner, R.A. Howard, M.J. Koomen [et al.] // *Solar Physics*. – 1995. – Vol. 162. – P. 357–402.
8. Giersch O. Analysis of the Radio Solar Telescope Network’s Noon Flux Observations over three solar cycles (1988 – 2020) / O.Giersch, J. Kennewell // *Radio Science*. – 2022. – Vol. 57, Iss. 8. – id. e2022RS007456.
9. Golubeva E.M. Rearrangements of open magnetic flux and formation of polar coronal holes in cycle 24 / E.M. Golubeva, A.V. Mordvinov // *Solar Physics*. – 2017. – Vol. 292. – P. 175.
10. Halain J.-P. The SWAP EUV Imaging Telescope. Part II: In-flight Performance and Calibration / J.-P. Halain, D. Berghmans, D. B. Seaton [et al.] // *Solar Physics*. – 2013. – Vol. 286. – P. 67–91.
11. Howard R.A. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) / R.A. Howard, J.D. Moses, A. Vourlidas [et al.] // *Space Science Review*. – 2008. – Vol. 136, Iss. 1-4. – P. 67–115.
12. Kundu M.R. 6 centimeter observations of solar active regions with 6" resolution / M.R. Kundu, C.E. Alissandrakis, J.D. Bregman, A.C. Hin // *The Astrophysical Journal*. – 1977. – Vol. 213. – P. 278–295.
13. Nakajima H. The Nobeyama radioheliograph / H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome [et al.] // *Proc. IEEE*. – 1994. – Vol. 82, Iss. 5. – P. 705–713.
14. Seaton D.B. The SWAP EUV Imaging Telescope Part I: Instrument Overview and Pre-Flight Testing / D.B. Seaton, D. Berghmans, B. Nicula [et al.] // *Solar Physics*. – 2013. – Vol. 286. – P. 43–65.
15. Sheeley N.R. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30  $R_{Sun}$  / N.R. Sheeley, Y. Wang, S.H. Hawley [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 1997. – Vol. 484. – P. 472–478.

16. Sheeley N.R. Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections / N.R. Sheeley, J.H. Walters, Y. Wang, R.A. Howard / *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104, no. A11. – P. 24739–24768.
17. Song H.Q. A Statistical Study on the Morphology of Rays and Dynamics of Blobs in the Wake of Coronal Mass Ejections / H.Q. Song, X.L. Kong, Y. Chen [et al.] // *Solar Physics*. – 2012. – Vol. 276. – P. 261–276.
18. St Cyr O.C. White-light coronal mass ejections: A new perspective from LASCO / O.C. St Cyr, R.A. Howard, G.M. Simnett [et al.] // *Correlated Phenomena at the Sun, in the Heliosphere and in Geospace: Proc. 31-th ESLAB Symp. "Correlated Phenomena at the Sun, in the Heliosphere and in Geospace"*. – 1997. – Vol. 415. – P. 103.
19. Stewart G.A., Solar flare activity and the structure of the coronal neutral line / G.A. Stewart, S. Bravo / *Solar Physics*. – 1995. – Vol. 160. – P. 331–341.
20. Uralov A.M. 17 GHz neutral line associated sources: birth, motion, and projection effect / A.M. Uralov, G.V. Rudenko, I.G. Rudenko // *Publ. Astron. Soc. Japan*. – 2006. – Vol. 58. – P. 21.
21. Uralov A.M. Microwave neutral line associated source and a current sheet / A.M. Uralov, V. V. Grechnev, G. V. Rudenko, I. G. Rudenko, H. Nakajima // *Solar Physics*. – 2008. – V. 249. – P. 315–335.
22. Van Doorselaere T. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: an overview of recent results (Invited Review) / T. Van Doorselaere, E.G. Kupriyanova, D. Yuan // *Solar Physics*. – 2016. – Vol. 291, Iss. 11. – P. 3143–3164.
23. Wang Y. Coronal white-light jets near sunspot maximum / Y. Wang, N.R. Sheeley, Jr. // *The Astrophysical Journal*. – 2002. – Vol. 575. – P. 542–552.
24. Yan Y. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies / Y. Yan, Z. Chen, W. Wang [et al.] // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2021. – Vol. 8 – P. 20.
25. Yu H. The three-dimensional analysis of Hinode polar jets using images from LASCO C2, the STEREO COR2 coronagraphs, and SMEI / H. Yu, B.V. Jackson, A. Buffington, [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 2014. – Vol. 784 – P. 166.
26. Zhdanov D. A. Broadband microwave spectropolarimeter / D.A. Zhdanov, V.G. Zhdanov // *Central European Astrophysical Bulletin*
27. . – 2011. – Vol. 35. – P. 223.
28. CME\_list [Электронный ресурс]. // Каталог KBM по данным КА SOHO: сайт. – URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) (дата обращения 02.08.2023).

29. CME\_list [Электронный ресурс]. // Каталог KBM по данным КА STEREO: сайт.  
– URL: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi.php> / (дата обращения 02.08.2023).

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № 197 от 09.11.2023

Объем 24 с. Тираж 150 экз.