

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
Кандидат физ.-мат. наук  
Просовецкий Д.В.

Иркутск – 2023

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЖЕТОВ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ STEREO И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	18
<b>1.2 ИНСТРУМЕНТЫ И ДАННЫЕ.....</b>	20
<b>1.3 МЕТОД И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЖЕТОВ.....</b>	23
<b>1.4 РЕЗУЛЬТАТЫ.....</b>	25
<b>1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЖЕТОВ .....</b>	33
<b>ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 1 .....</b>	<b>40</b>
<b>ГЛАВА 2. ИНЛ КАК ПРЕДВЕСТНИК ВСПЫШЕК КЛАССА X ПО МНОГОВОЛНОВЫМ ДАННЫМ НОВОГО ИНСТРУМЕНТА SRG .....</b>	<b>41</b>
<b>2.1 ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАНЕЕ ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....</b>	41
<b>2.2 ИНСТРУМЕНТЫ И ДАННЫЕ.....</b>	44
<b>2.3 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АО 12 673 .....</b>	50
<b>2.4 МЕТОДОЛОГИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКА.....</b>	52
<b>2.5 АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЯ АО .....</b>	54
<b>2.6 СРАВНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОЛОЖЕНИЕМ РАДИОИСТОЧНИКА.....</b>	56
<b>2.7 АНАЛИЗ СПЕКТРА АО 12673 .....</b>	58
<b>ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 2.....</b>	<b>59</b>
<b>ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ИСТОЧНИКОМ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ В МИКРОВОЛНОВОМ И ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 КПП И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ .....</b>	60

<b>3.2 ОТБОР СОБЫТИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3 ДАННЫЕ И ИНСТРУМЕНТЫ.....</b>	<b>64</b>
<b>3.4 АНАЛИЗ СОБЫТИЯ .....</b>	<b>65</b>
<b>3.5 АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ.....</b>	<b>67</b>
<b>3.6 АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧНОСТИ ВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ .....</b>	<b>74</b>
<b>ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 3.....</b>	<b>80</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>81</b>
<b>СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>83</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>84</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>100</b>

## Введение

### Актуальность работы

Влияние Солнца на Землю и жизнедеятельность человека сложно переоценить. Именно поэтому происходящие на нем процессы вызывают пристальное внимание с давних времен. Первоначальные наблюдения за пятнами, положившее начало изучению циклов солнечной активности и развитию теории солнечного динамо, наблюдение хвостов комет и предположение о влиянии на них Солнца, в дальнейшем сформировали направление, связанное с солнечным ветром (СВ). Развитие инструментальной базы позволило получить детальное описание происходящих в солнечной атмосфере событий: формирования активных областей, вспышек, корональных петель и корональных выбросов массы (КВМ). В настоящее время продолжают создаваться новые обсерватории, в том числе внеатмосферные, ведущие постоянное наблюдение Солнца в различных диапазонах электромагнитного спектра. 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 и внеатмосферных обсерваторий с большим временным и пространственным разрешением позволяет фиксировать быстропротекающие явления и обнаруживать мелкомасштабные детали в структуре солнечной атмосферы. Проведение многоволновых наблюдений способствует более точному определению областей энерговыделения на различных высотах солнечной атмосферы.

Одной из фундаментальных вопросов физики Солнца является проблема 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, формирующие космическую погоду – вспышки, КВМ и формирование высокоскоростных потоков СВ. Разностороннее и комплексное изучение этих явлений значительно увеличило понимание процессов солнечной активности (СА), происходящих в солнечной атмосфере, хотя многие аспекты все еще остаются 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, прогнозирующие 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 происходящих процессах энерговыделения. Наблюдения в различных диапазонах длин волн 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: корональные дыры (КД) и стримеры. Появившиеся наблюдательные возможности способствовали появлению новых направлений для исследований, таких как корональная гелиосейсмология, и обнаружению новых явлений: корональных дождей, диммингов и др.

Кроме крупномасштабных явлений, таких как КВМ, важную роль во влиянии СВ на межпланетную среду играет его тонкая структура. Одним из ее проявлений являются джеты – плотные узкие струи вещества, более яркие на фоне окружающей плазмы. Наблюдаются джеты в различных диапазонах: рентгеновском, ультрафиолетовом, белом свете (см. подробное описание и рисунок в Главе 1).

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 магнитную структуру, состоящую из областей противоположной полярности, достигающих иногда 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 диагностировать процессы и явления, недоступные для обнаружения в других диапазонах, например, генерацию ускоренных электронов на ранних стадиях эволюции вспышки или возникновение квазистационарных радиоисточников над линией инверсии магнитного поля.

Наличие квазистационарного радиоисточника, расположенного над линией инверсии радиальной компоненты магнитного поля, является особенностью некоторых АО. Впервые они были обнаружены [Kundu et al., 1977] и названы Neutral Line associated Sources по расположению вблизи линии инверсии полярности магнитного поля. Дальнейшие их исследования по наблюдениям на частоте 5.7 ГГц на Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ) [Уралов и др., 1996], Радиогелиографе Нобеяма на частотах 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, являются механизмы распространения энергии в широком диапазоне высот в солнечной атмосфере. Общепринято, что явление солнечной вспышки может затрагивать уровни от фотосферы до короны Солнца, вырываясь в межпланетное пространство в виде КВМ, радиовсплесков в метровом диапазоне и событий в солнечных космических лучах. Одним из инструментов, способных помочь в изучении этих процессов, 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, иметь треугольную форму и т.д. Причиной возникновения подобных особенностей может быть, как наложение излучения от нескольких источников, так и изменение параметров среды в области вспышки. До сих пор не ясно, какой процент происходящих на Солнце вспышек имеют КПП, поскольку их характерные периоды лежат в широких пределах от долей секунд до нескольких минут и требуют наблюдений с хорошим временным разрешением.

**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:

- Исследованы временные и пространственные характеристики джетов в потоках СВ из полярных областей короны Солнца;
- Исследованы процессы формирования источника над нейтральной линией магнитного поля в геоэффективной активной области с использованием двумерных многоволновых наблюдений Сибирского радиогелиографа-48;
- 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 данные наблюдений, а также соответствием теоретическим моделям.

#### **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.

#### **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 A.M. устный доклад "Analysis of non-stationary properties of QPPs by Siberian Radioheliograph: 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

### 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. Kasharova 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 // *СЗФ*. – 2021. – Т. 7. – №1. – Pp. 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 // *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* – 2016 – №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.

### **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, сформулирована цель работы и поставленные задачи, охарактеризованы новизна и практическая значимость.

**Первая глава** представляет исследование динамики распространения джетов в потоках СВ в солнечной короне по данным космических аппаратов (КА) STEREO и определения их возможных источников. Глава начинается с обзора литературы, посвященного результатам наблюдений джетов в СВ в различных диапазонах электромагнитного спектра. Описан предмет исследования, приведены примеры наблюдаемых джетов, определены частота их появления и значения проекции скоростей на картинную плоскость. Проанализирована возможная взаимосвязь с циклом СА и приведено сравнение полученных результатов с работами других авторов.

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

**Вторая и третья** главы посвящены анализу особенностей микроволнового излучения АО 12673 с привлечением многоволновых данных макета Сибирского радиогелиографа (СРГ-48).

Во **второй** главе приведено описание инструмента СРГ-48 и преимущества многоволновых двумерных наблюдений в диапазоне 4-8 ГГц для исследования процессов на Солнце. Приведен обзор литературы, посвященный истории открытия и результатам исследований ИНЛ. Описывается методика идентификации ИНЛ в микроволновом диапазоне на нескольких длинах волн, основанная на сопоставлении радиокарт с магнитограммами. Рассматривается наличие микроволнового источника излучения над нейтральной линией фотосферного магнитного поля в АО 12673 как предвестника мощных солнечных вспышек. Проводится анализ местоположения ИНЛ и сравнение с данными наблюдений других обсерваторий.

В конце второй главы приведены выводы о возможности обнаружения ИНЛ на многоволновых данных СРГ.

**Третья** глава посвящена многоволновому анализу квазипериодических колебаний вспышки рентгеновского класса С6.9, произошедшей в проанализированной в предыдущей главе АО. Глава начинается с обзора литературы посвященного характеристикам КПП и их применения для диагностики процессов в солнечных вспышках. Описаны и проанализированы одновременные наблюдения КПП в дециметровом и микроволновом диапазонах на данных радиогелиографов MUSER и СРГ-48. Предложена схема, объясняющая возникновение КПП в различных диапазонах.

Основной вывод третьей главы состоит в 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.

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

## **Глава 1. Исследование динамики распространения джетов в солнечной короне по данным космических аппаратов 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, яркие лучи стримеров, на отдельных изображениях видны КВМ. Но кроме этих структур, при просмотре последовательности изображений на фоне лучевой структуры видно множество мелких неоднородностей, удаляющихся от Солнца. Они наблюдаются разнообразными инструментами в различных диапазонах: Yohkoh [Shibata et al., 1992; Shimojo et al., 1996], SOHO [Wood et al., 1999; Wang and Sheeley, 2002; Yu et al., 2014], STEREO [Patsourakos et al., 2008; Nisticò et al., 2009; 2010; Feng et al., 2012], Hinode [Cirtain et al., 2007; Savcheva et al., 2007; Moore et al., 2010, 2013], SDO [Hong et al., 2011, 2013; Young and Muglach, 2014] и IRIS [Chen and Innes, 2016]. Эти транзиенты упоминаются в работе [St Cyr et al., 1997], наряду с описанием КВМ, как "новые мелкомасштабные явления", которые наблюдались, в основном, в северном полушарии Солнца в мае 1997 г., имели размеры около  $3^\circ$  и скорости 371– 512 км/с. В дальнейшем неоднократно отмечалось на изображениях коронографов LASCO/SOHO [Brueckner et al. 1995] наличие неоднородностей, не похожих по своим характеристикам и структуре на КВМ [Wang, Sheeley Jr., 2002; Yu et al., 2014]. Подобные явления также отметил в своей работе [Gurman et al., 1998]. Многолетние наблюдения показывают, что подобные плазменные неоднородности постоянно присутствуют в СВ и являются гораздо более частыми явлениями, чем привычные и крупномасштабные КВМ или вспышки [Cirtain et al., 2007].

Исследование джетов в рентгеновском и КУФ-диапазонах показало широкий диапазон их скоростей от 200 км/с [Wang et al., 1998a] до более 1000 км/с [Yu et al., 2014]. В работе [Savcheva et al., 2007] по данным рентгеновского телескопа XRT/Hinode показано, что внутри полярных корональных дыр (ПКД) в среднем наблюдается около 60 джетов в сутки. Авторы также измерили такие их характеристики как проекции скоростей на картинную плоскость, высоту, ширину и время жизни, а также собрали статистические данные о поперечных движениях и падений обратно на поверхность Солнца. [Shimojo et al., 1996] и [Shimojo and Shibata, 2000] показали, что джеты, наблюдаемые в рентгеновском диапазоне, можно разделить на две группы по скоростям: одну со скоростями вблизи значения Альфвеновской скорости (600–800 км/с), а другую - околосвуковой (~200 км/с). Формирование джетов может происходить как в холодной плазме, например, спикул [Sterling, 2000; Yamauchi et al., 2005], так и в горячей плазме [Shibata et al., 1992; Shimojo et al., 1996; Wang et al., 1998a]. Информацию о температуре джетов дало исследование Nisticò [Nisticò et al., 2011], показавшее температуру электронов в диапазоне от 0.8 МК до 1.3 МК, что согласуется с результатами [Young and Muglach, 2014], изучавших связь между струйными выбросами плазмы (blowout jets) и яркими точками в их основании. Джеты наблюдаются во всех областях солнечной атмосферы: в КД [Wang et al., 1998b; Nisticò et al., 2009; 2010; 2011], на спокойном Солнце [Paraschiv et al., 2010] и в АО [Shimojo et al., 1996; Shimojo and Shibata, 2000; Chen and Innes, 2016]. Подобные события легче всего наблюдать вблизи КД из-за контраста между яркостью джетов и низким уровнем яркости окружающей холодной плазмы. Средняя частота появления джетов на границах ПКД оказалась выше, чем на спокойных участках в полярных областях солнечной короны или внутри КД [Sako et al., 2013]. [Nisticò et al., 2009] определил для 79 джетов в КУФ диапазоне такие характеристики как форма и время жизни, а измеренные скорости составляли 200-400 км/с. Наблюдения также подтвердили хорошее детектирование джетов в ПКД и преобладание количества событий в северном полушарии над южным. Анализ джетов во время минимума СА показал,



что джеты, наблюдаемые в белом свете на расстояниях в несколько солнечных радиусов от поверхности, являются продолжением джетов, наблюдаемых в КУФ и формирующихся из ярких точек внутри ПКД [Wang et al., 1998b]. Расчетные значения проекции скоростей на картинную плоскость передней кромки джетов лежали в пределах 400–1100 км/с. Таким образом, выдвинуто предположение о КД как источниках джетов в минимуме СА. В работе [Filippov et al., 2013] также показано, что джеты с формой типа "Эйфелева башня", описанной в работе [Nisticò et al., 2009], превращаются в узкую струю белого света на более далеких расстояниях во внешней короне. [Paraschiv et al., 2010] идентифицировали и изучили более 10 000 плазменных джетов, наблюдаемых в белом свете на различных позиционных углах со средней скоростью 600 км/с в минимуме СА между 2007 и 2008 гг. по данным STEREO/COR1. Областями формирования джетов были определены не только КД, но и участки спокойного Солнца. Проанализированная [Raouafi, 2009] корреляция между джетами и полярными щеточками показала, что ~90% наблюдаемых джетов связаны с полярными перьями. Таким образом, наблюдения джетов с различными свойствами на протяжении всего цикла СА показали, что джеты, обнаруживаемые в КУФ диапазоне, могут распространяться на значительные расстояния от поверхности Солнца и наблюдаться коронографами белого света.

[Shimojo et al., 1996; Shimojo and Shibata, 2000] выдвинули предположение о магнитном пересоединении в основаниях, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне джетов в качестве их источников. В работе [Panesar et al., 2018] описано исследование 13 случаев наблюдения джетов на диске Солнца с использованием данных Hinode/XRT, SDO/AIA и фотосферных магнитограмм SDO/HMI для изучения механизма их формирования. В работе [Filippov et al., 2009] предложен сценарий, объясняющий основные свойства джетов – связь с магнитными структурами на поверхности Солнца, быстрое радиальное движение, возможный нагрев – основанный на предположении о возникновении джетов над нулевой точкой магнитного поля. Позже было рассмотрено формирование джета,

наблюдаемого в белом свете, на основе квадрупольной конфигурации магнитного поля в его основании. Авторы подтвердили, что значительные изменения магнитного поля над АО могут быть причиной возникновения джета, который рассматривается как мелкомасштабная эрупция. [Joshi et al., 2017] обнаружили, что возникающие перед вспышками струйные выбросы сопровождаются значительными изменениями в конфигурации магнитных силовых линий открытой и закрытой компонент магнитного поля в АО. Около половины наблюдаемых в полярных областях солнечной короны в рентгеновском диапазоне джетов в работе [Moore et al., 2010; 2013] имели стандартный сценарий формирования корональных джетов путем магнитного пересоединения. А другая часть, названная им нестандартные джеты - "blowout jets", имела нестандартную конфигурацию основания в виде магнитной арки, свойственной для КВМ, но на меньших масштабах (см. также [Chandra et al., 2017]). Такие нестандартные джеты обычно наблюдались на начальных стадиях вспышек или предшествовали КВМ. Большой джет наблюдался перед вспышкой, инициированной эрупцией волокна в АО и авторы подтвердили возникновение джета при дестабилизации магнитной конфигурации АО перед вспышкой [Joshi et al., 2017]. А [Moore et al., 2018] и [Sterling et al., 2015] показали, что механизм, запускающий эрупцию волокна, одинаков для больших КВМ и джетов.

### **1.1 Определение предмета исследования**

В литературе термин "джет" обычно применяется к наблюдениям в КУФ диапазоне и означает узкую плотную струю плазмы, выделяющуюся на фоне окружающего вещества, распространяющуюся не далее 1-2 солнечных радиусов и часто падающую обратно на поверхность Солнца. С другой стороны, на изображениях солнечной короны в видимом диапазоне привыкли наблюдать, в основном, КВМ различных масштабов. Устоявшегося же термина для мелкомасштабного класса явлений на данный момент в литературе не существует, а в текстах зарубежных статей чаще всего используется термин "jet" или "blob" (см,

например, [Wang et al., 1998a,b; Wang and Sheeley, 2002], охватывающий достаточное широкий спектр явлений от струй в рентгеновском и КУФ диапазонах, до небольших эрупций, наблюдаемых в белом свете на расстояниях в несколько солнечных радиусов. 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).

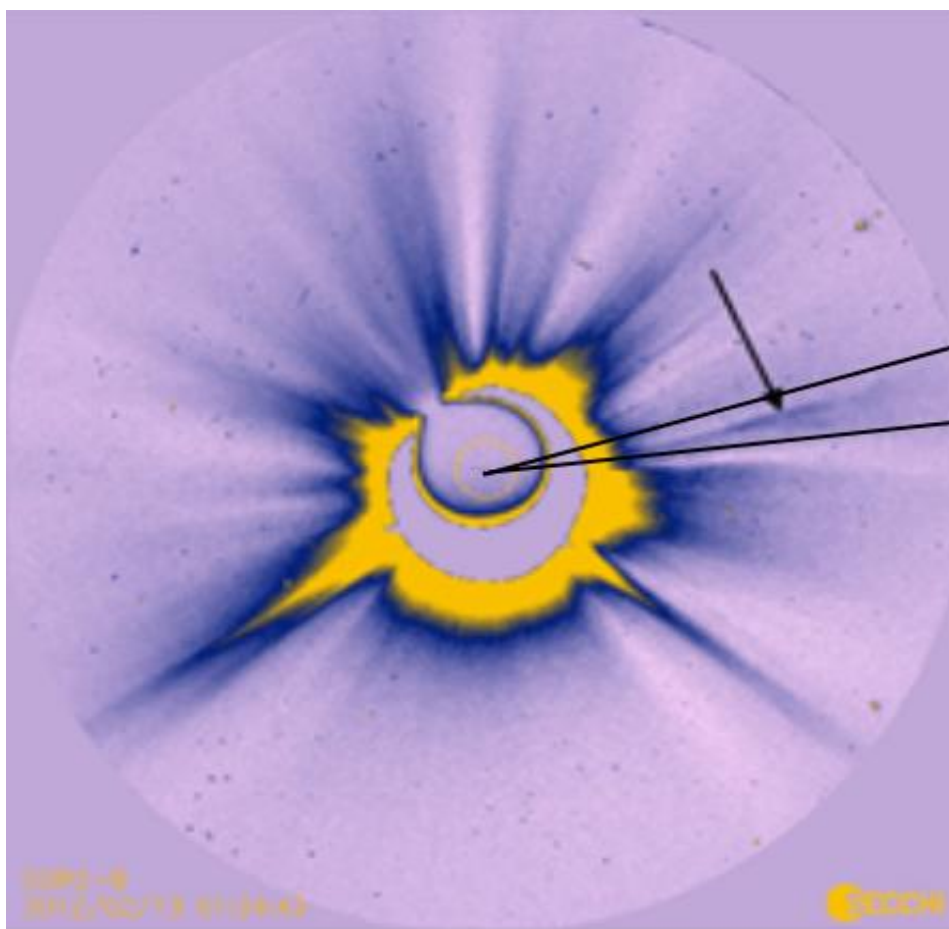


Рисунок 1. Изображение солнечной короны, полученное КА STEREO в белом свете (негатив). Стрелкой в выделенном секторе обозначен пример джета.

В работе не учитывались проекционные эффекты и предполагается, что все джеты движутся в картинной плоскости. Движение джетов по направлению от Солнца выглядело как изменение яркости внутри визуально наблюдаемых отдельных потоков плазмы от кадра к кадру, никаких падающих обратно на поверхность Солнца структур не наблюдалось. Размеры и яркость относительно окружающего вещества были различны, по мере удаления от Солнца с течением времени джеты расплывались и становились менее видимыми на фоне окружающей плазмы. Большая часть джетов становилась плохо различима к краю поля зрения коронографа (16 солнечных радиусов), но часть переставала однозначно идентифицироваться уже к 10 солнечным радиусам. Продольные размеры составляли 1-3 солнечных радиуса, поперечные около  $3^\circ$ . В полярных областях были определены характеристики для 1408 джетов. Высоты первого появления джета на изображении различны, самая нижняя граница составляла 3.5 солнечных радиусов, верхняя – 6.1.

## 1.2 Инструменты и данные

Для статистического исследования джетов использовались коронографы COR2/STEREO и для определения возможных областей формирования джетов были использованы данные коронографов, наблюдающих диск Солнца в различных спектральных линиях: коронографы STEREO/EUVI и SDO/AIA.

Космическая обсерватория STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) была запущена в 2006 году и являлась первой миссией с возможностью стереоскопических наблюдений Солнца [Howard et al., 2008]. Основной целью миссии было наблюдение трехмерной структуры KBM и их влияния на Землю при определенном расположении КА относительно Земли.

STEREO состоит из двух близких по параметрам аппаратов - STEREO-Ahead (STEREO-A) и STEREO-Behind (STEREO-B), движущихся по околоземной орбите навстречу друг другу. Названия аппаратам были даны согласно их положению относительно Земли: STEREO-A движется перед планетой,

удаляясь от нее примерно на  $22^\circ$  в год, в то время как STEREO-B движется позади Земли, отставая от нее примерно на  $21^\circ$  (Рисунок 2).

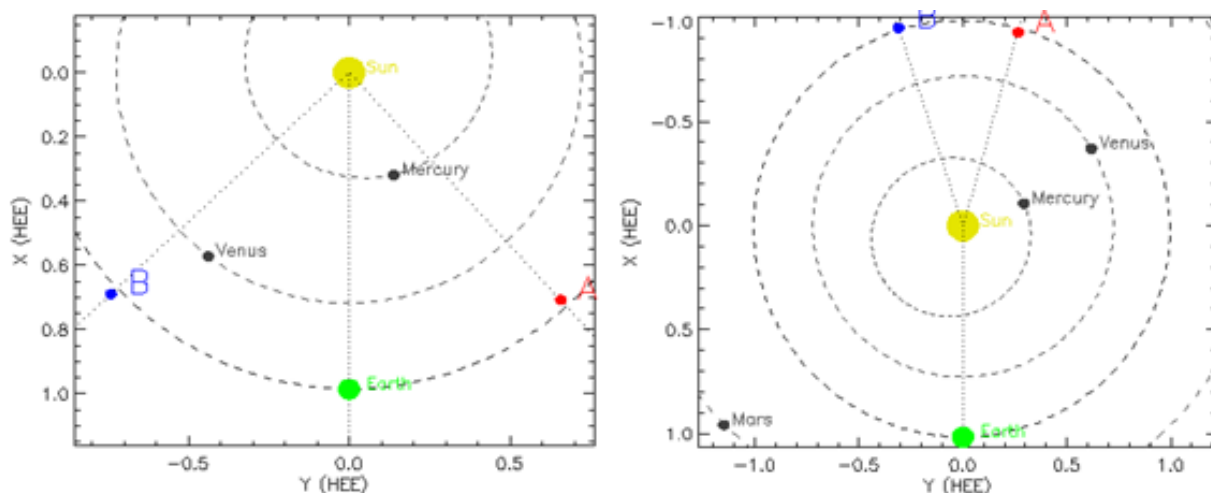


Рисунок 2. Положение КА STEREO на начало (слева, 2009 год) и на окончание (справа, 2014 год) исследования. Желтым кругом обозначено Солнце, зеленым - Земля, буквами А и В - КА STEREO-A и STEREO-B, соответственно.

После 2014 года функционировать остался только один из спутников - STEREO-A. На каждом КА установлены следующие инструменты: комплекс SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation), включающий в себя 5 инструментов: STEREO/WAVES (SWAVES), отслеживающий радиовсплески, In-situ Measurements of Particles And CME Transients (IMPACT), измеряющий различные параметры межпланетной среды, и PLasma And Supra Thermal Ion Composition (PLASTIC), позволяющий измерить параметры окружающей плазмы. Комплекс SECCHI, состоящий из коронографа Extreme UltraViolet Imager (EUVI), наблюдающего хромосферу и нижнюю корону до 1.7 солнечных радиусов в 4 эмиссионных линиях в КУФ диапазоне, затменных коронографов типа Лио COR1 и COR2, широкоугольных коронографов HI-1 и HI-2, наблюдающих корону до 215 солнечных радиусов.

Внутренние коронографы COR1 являются классическими затменными коронографами-рефракторами типа Лио с искусственной "луной", перекрывающий яркое излучение диска Солнца. Область зрения охватывает

расстояния от 1.4 до 4 солнечных радиусов, временное разрешение 8 минут, пространственное 7.5".

Внешние коронографы COR2 также являются коронографами Лео затменного типа. Область зрения составляет от 2.5 до 15 солнечных радиусов, временное разрешение 15 минут, пространственное 14.7".

Детекторы EUVI/STEREO получают изображения полного диска Солнца в четырех спектральных каналах 171, 284, 195 и 304 Å, соответствующих температурному диапазону от 0.1 до 2 МК. Пространственное разрешение коронографа составляет 0.6" [STEREO mission].

Анализировались наблюдения за весь доступный для анализа период – с 2009 по 2014 год. В остальные промежутки времени были нерегулярные наблюдения, часто попадались непригодные вследствие артефактов данные, 2014 год обработан только частично, поскольку не были доступны данные. В исследовании учитывались моменты наблюдений, когда не было зафиксировано КВМ. Разделение наблюдаемых джетов и корональных выбросов массы (КВМ) происходило с использованием каталогов КВМ SOHO и STEREO [CME list SOHO, CME list STEREO].

Для изучения связи характеристик джетов с циклом СА были выбраны только полярные области в пределах  $\pm 30^\circ$  от оси север-юг, что коррелирует с широтой эквивалентной  $60^\circ$  градусам солнечной широты, поскольку полярные магнитные поля формируются выше  $55^\circ$  градусов [Lowder et al., 2014; de Toma, 2012].

Детекторы EUVI/STEREO получают изображения полного диска Солнца в четырех спектральных каналах 171, 284, 195 и 304 Å, соответствующих температурному диапазону от 0.1 до 2 МК. Пространственное разрешение коронографа составляет 0.6".

Космическая обсерватория Solar Dynamics Observatory (SDO) была запущена в 2010 году для комплексного изучения магнитных полей и корональных структур на Солнце. SDO состоит из трех инструментов: Atmospheric Imaging

Assembly (AIA), получающего изображение полного диска Солнца в диапазоне от белого света до КУФ, Extreme ultraviolet Variability Experiment (EVE), измеряющего спектральное распределение солнечного излучения, Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), измеряющего магнитные поля и скорости движений участков солнечной поверхности [Scherrer et al., 2012]

AIA состоит из четырех телескопов, получающих изображения полного диска Солнца и нижней короны до расстояния 1.3 солнечных радиусов в 10 каналах: белый свет, 1700, 304, 1600, 171, 193, 211, 335, 94 и 131 Å. Пространственное разрешение составляет 1.2", временное разрешение 12 с, точность измерений 0.6 пикселя [Lemen et al. 2012].

### 1.3 Метод и идентификация джетов

Для отслеживания перемещения с течением времени любых неоднородностей часто используется метод высотно-временных диаграмм, на которых по оси ординат откладывается пройденное расстояние (высота в данном случае), по оси абсцисс – время. Поскольку яркость наблюдаемых джетов по сравнению с окружающей фоновой плазмой невелика, то была использована техника "бегущей разности" при которой из каждого последующего изображения вычитается предыдущее, что позволяет увеличить контрастность структур. Для определения характеристик потоков солнечного ветра использовались изображения COR2/STEREO уровня обработки lz 0.5, затем данные анализировались при помощи процедур обработки библиотеки SolarSoft для инструмента SECCHI для среды программирования IDL.

На полученных разностных изображениях вдоль направления позиционного угла распространения джета в потоке солнечного ветра вырезалась полоса шириной несколько пикселей, к ней применялось скользящее сглаживание, и эти полосы составлялись в хронологическом порядке, образуя высотно-временную диаграмму. Ширина полосы в каждом случае выбиралась немного больше поперечного размера джета для уменьшения соотношения сигнал/шум

на диаграмме. Таким образом высотно-временная диаграмма отражает перемещение джетов, которое выглядит как наклонные полосы (Рисунок 3).

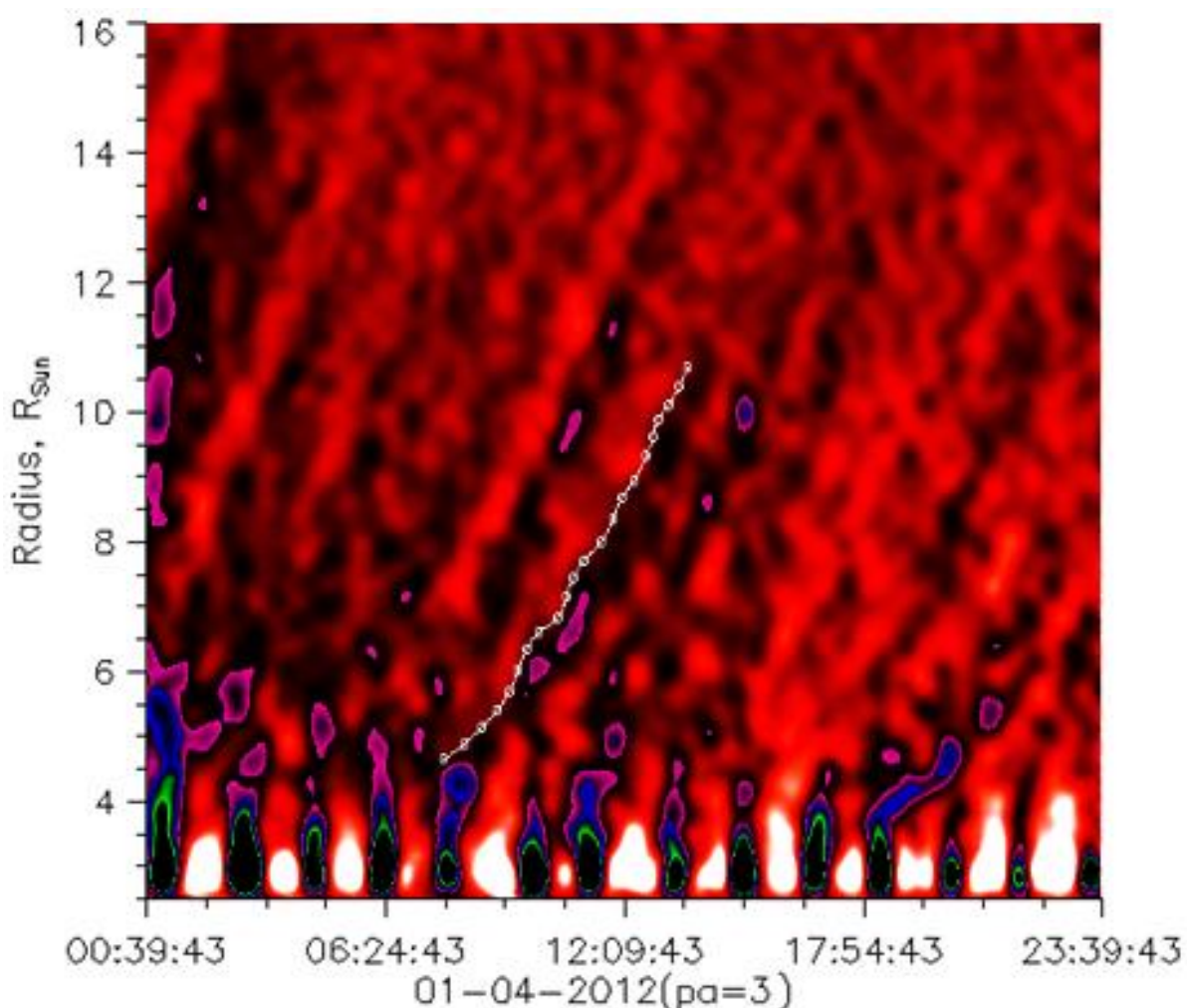


Рисунок 3. Пример высотно-временной диаграммы и линия вдоль траектории движения джета.

На полученных диаграммах перемещение корональных структур выглядит как сдвоенные светло-темные структуры, в которых первой по направлению движения расположена светлая часть, что отражает увеличение концентрации плазмы по сравнению с предыдущим по времени кадром. Подобная методика исследования динамических характеристик солнечного ветра неоднократно применялась различными авторами [Sheeley et al., 1997; Wang et al., 1998a]. Граница между темной и светлой частью трека принималась за передний фронт



джета. Для каждого джета, который было возможно выделить на высотнo-временной диаграмме, отмечались координаты для определения скорости фронта. Скорость вычислялась как отношение пространственного расстояния между двумя точками ко времени между измерениями.

#### 1.4 Результаты

Для оценки зависимости появления джетов с течением солнечного цикла была использована частота их появления за год. Количество наблюдаемых джетов меняется с каждым днем, и оно неодинаково для южного и северного полушария. Кроме того, иногда они наблюдаются только в одном из полушарий. На Рисунке 4 представлено распределение количества джетов за разные года отдельно для северного и южного полушария.

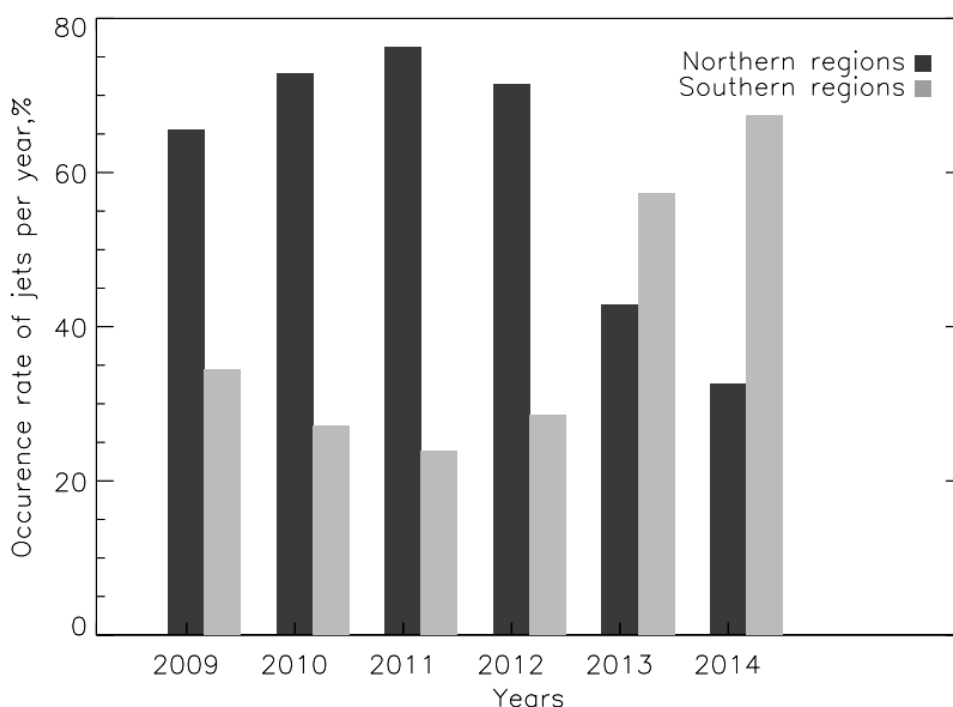


Рисунок 4. Количество джетов в северном и южном полушарии в зависимости от года.

На Рисунке 4 видно, что для северного полушария количество джетов в 2011 году превышало их количество в 2014 в два раза. Для южного полушария

ситуация противоположная - в 2014 году количество джетов превосходит наблюдаемое в 2011. Этот факт отражает значительную асимметрию для северного и южного полюсов. После 2012 года количество джетов возрастает в северном полушарии и убывает в южном, но затем, асимметрия повторяется. В Таблице 1 приведены значения количества джетов для обоих полушарий за каждый год и в зависимости от угла, отсчитываемого от оси север-юг. Полярные области были разделены на три сектора по 10° каждый и измерено количество джетов в каждом из них.

Таблица 1. Угловое распределение джетов в полярных областях солнечной короны

Год	Количество джетов						Общее кол-во джетов в северном полушарии	Общее кол-во джетов в южном полушарии
	Северное полушарие			Южное полушарие				
	0°-10°	10°-20°	20°-30°	0°-10°	10°-20°	20°-30°		
2009	42	49	40	24	18	29	131	71
2010	66	79	96	30	28	35	241	93
2011	55	57	63	17	15	23	175	55
2012	51	55	58	17	23	30	164	70
2013	64	44	27	64	68	54	135	186
2014	18	8	3	24	18	16	29	58

Для определения достоверности наблюдаемой асимметрии для каждого года были посчитаны показатели асимметрии по формуле (1):

$$As = \frac{|N-S|}{\sqrt{N+S}}, \quad \begin{matrix} As > 1 \\ As \leq 1 \end{matrix} \quad (1)$$

где  $As$  – показатель асимметрии,  $N$  – число событий в северном полушарии,  $S$  – число событий в южном полушарии [Carbonell et al, 1993].

Получившиеся значения оказались много меньше 1, что свидетельствует о реально существующей асимметрии.

Изменения в угловом распределении джетов рассмотрено отдельно для каждого полюса (Рисунок 5).

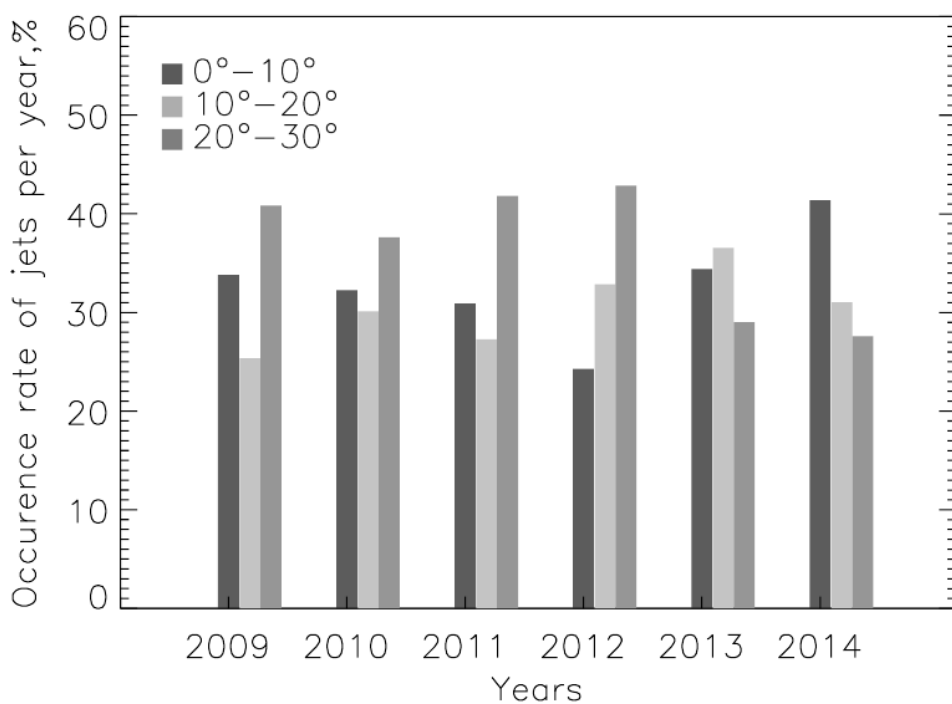
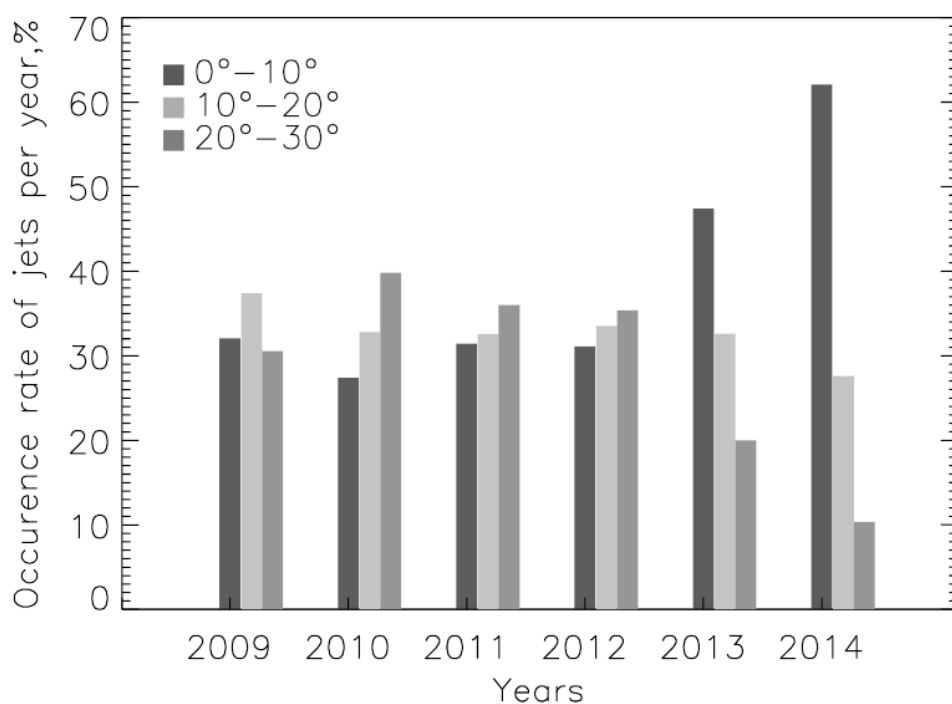


Рисунок 5. Угловое распределение джетов в северном (сверху) и южном (снизу) полушариях.

В северном полушарии до 2012 года джеты наблюдались равномерно распределенными по всем трем диапазонам углов, но после 2012 года

располагались ближе к оси север-юг. Для северного полюса заметны резкие изменения в угловом распределении – увеличение количества джетов для сектора  $0^\circ$ - $10^\circ$  и убывание для  $20^\circ$ - $30^\circ$  с течением времени. Для южного полюса картина похожая, но изменения не столь выражены. Количество джетов в диапазоне углов  $10^\circ$ - $20^\circ$  практически не меняется из года в год.

Также были посчитаны значения проекции скоростей на картинную плоскость для всех джетов для обоих полюсов. Рисунок 6 показывает их нормализованное распределение за весь исследуемый период для северного и южного полюсов.

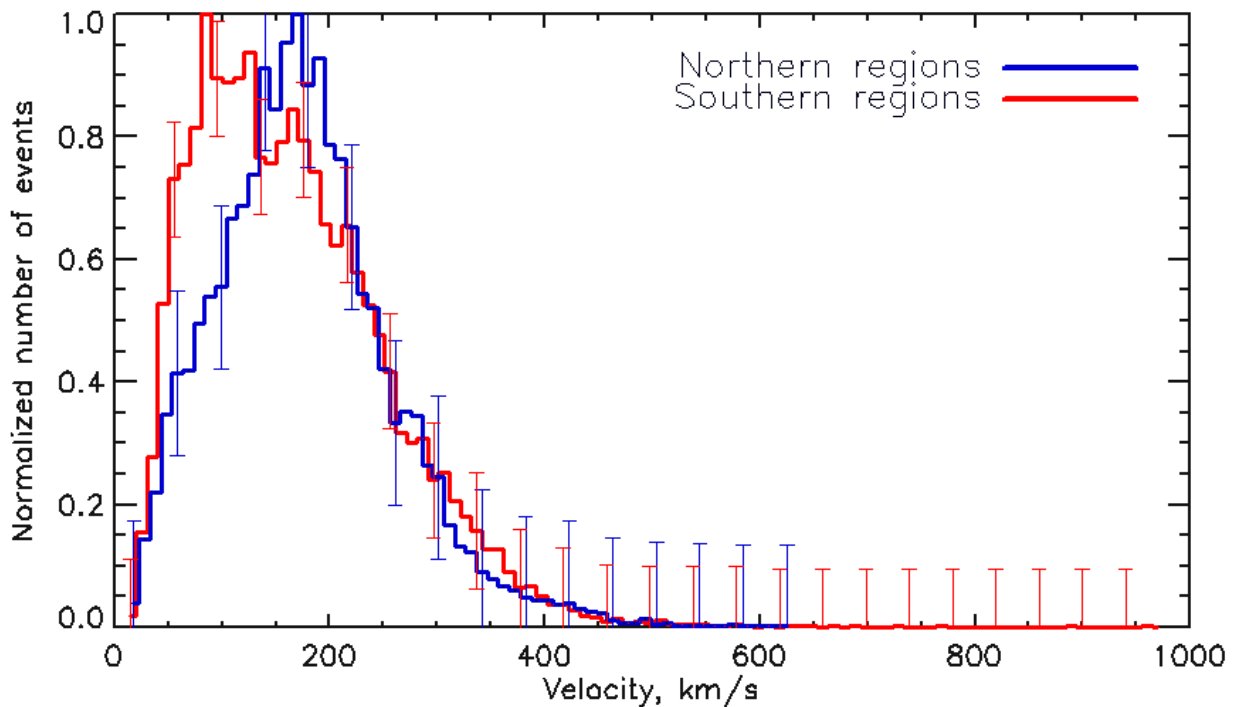


Рисунок 6. Распределение значений проекций скоростей джетов на картинную плоскость.

Среднее значение проекций скоростей лежат в пределах  $180 \pm 62$  км/с для северного полюса и  $170 \pm 71$  км/с для южного. Распределение скоростей для событий над южным полюсом имеет высокоскоростной "хвост" ( $>400$  км/с) и достигает значений в 1000 км/с. В то время как для северного полюса значения скоростей джетов ограничены только 700 км/с. Тем не менее, стоит отметить

малое число зафиксированных высокоскоростных джетов для обоих полюсов. Из результатов измерения широтного распределения скоростей потоков СВ известно, что над полюсами Солнца обычно присутствует высокоскоростной СВ со значениями скоростей более 500 км/с (см, например, результаты измерений КА “Ulysses”). Однако, в работе [Tosumaru et al., 2021] показано, что согласно результатам измерения скоростей СВ при помощи радиомерцаний, в высокоширотных областях солнечной короны преобладали значения до 450 км/с. Вклад потоков со скоростями более 600 км/с был невелик в общее распределение скоростей. Таблица 2 показывает изменения средних скоростей джетов в зависимости от года над разными полюсами.

Таблица 2. Среднее значение проекции скоростей джетов на картинную плоскость.

Год	Среднее значение проекции скоростей, км/с	
	Северное полушарие	Южное полушарие
2009	134 ± 6	101 ± 37
2010	179 ± 52	176 ± 62
2011	190 ± 53	200 ± 59
2012	229 ± 59	203 ± 69
2013	192 ± 56	203 ± 60
2014	167 ± 47	243 ± 79

Как и для количества джетов, наблюдается асимметрия в значениях скоростей в течение исследуемого периода. В Приложении представлено распределение средних скоростей для каждого года по отдельности для каждого полюса. Сравнение распределений показывает, что они значительно отличаются для северного и южного полюсов для каждого года. Во-первых, все распределения для южного полюса имеют "хвост" в области высокоскоростных значений. Во-вторых, пик распределения для северного полюса смещается в область высокоскоростных

значений с 2009 по 2012 год, в то время как для южного полюса это происходит с 2009 по 2014. Форма распределений также претерпевает изменения. Возрастающее количество джетов с высокими скоростями при приближении к максимуму цикла СА может быть связано с механизмом их формирования – магнитным пересоединением, количество и частота которого увеличивается на границах ПКД при приближении к максимуму.

Для определения причин асимметрии наблюдаемых джетов и их характеристик, было проведено сравнение свойств различных солнечных явлений в 24 цикле СА, таких как число солнечных пятен [Sunspot number], индекс вспышек [Bruevich and Yakunina, 2017], количество КВМ [Barlyaeva et al., 2018], знак и величина магнитного поля [Lowder et al., 2017]. Все эти исследования показывают значительную асимметрию явлений, наблюдаемых в северном и южном полушариях. Вся СА зависит от солнечного цикла и конфигурации глобального магнитного поля Солнца, и, согласно полученным результатам, полярные джеты также следует этому правилу. Таким образом, наблюдения и полученные результаты рассматриваются с точки зрения изменений, вызванных ходом солнечного цикла.

Первый результат, касается асимметрии в количестве джетов для разных полюсов и возможных причин ее инверсии в 2009-2014 годах. Сейчас известно, что 24 цикл СА имеет два максимума, как и многие другие, в том числе, предыдущий цикл СА также имел двойной пик. В работе [Golubeva and Mordvinov, 2017] приведен вывод о характерности асимметрии магнитного поля в северной и южной полусферах на восходящей фазе солнечного цикла. Двойные пики для солнечного цикла являются результатом такой северо-южной асимметрии магнитного поля, и северное полушарие обычно достигает максимума раньше [Nathaway, 2015]. Полушарная асимметрия в свойствах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля были исследованы из наблюдений КА "Улисс" в течение периода спада и фазы минимума 22-23 цикла СА, а значительные различия в параметрах для северного и южного полушария были описаны в работах [McComas et al., 2000;

Ebert et al., 2013]. Асимметрия солнечных явлений была давно обнаружена для факелов, протуберанцев [Waldmeier, 1971], вспышек и групп солнечных пятен [Roy, 1977]. Кроме того, [Petrie, 2015] показал, что изменение знака магнитного поля для южного полюса произошло в 2014-2015 годах, для северного полюса – "языки" противоположной полярности были зафиксированы в 2011, и полная смена знака произошла в 2013.

Второй полученный результат показывает изменение количества джетов с течением времени. Как уже упоминалось ранее, многие авторы считают причиной формирования джетов магнитное пересоединение на различных масштабах и в различных корональных структурах [Nistico et al., 2009; Wang and Sheeley, 2002]. В процессе смены знаков магнитного поля на полюсах [Golubeva and Mordvinov, 2017; Mordvinov and Yazev, 2014] происходит большое количество процессов магнитного пересоединения, что приводит к увеличению количества наблюдаемых джетов. Это предположение согласуется с [Moore et al., 2018; Sterling et al. (2015)], например. На Рисунке 7 (слева) отражено изменение соотношения между количеством наблюдаемых джетов в северном и южном полушариях.

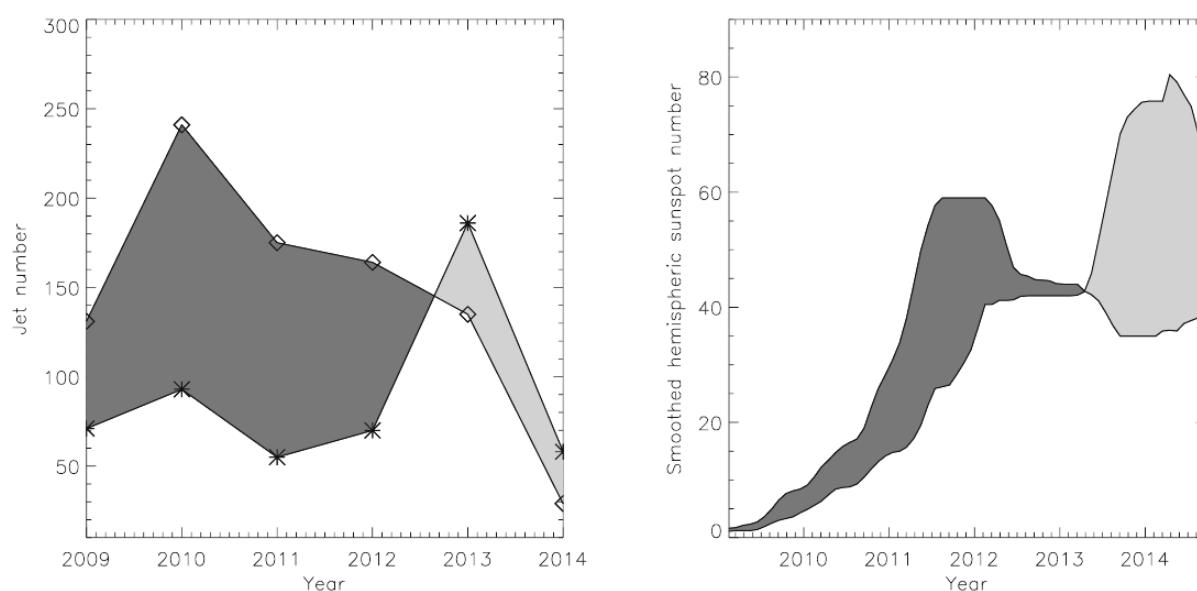


Рисунок 7. Преобладание количества джетов в одном полушарии над другим.

Заполненные области показывают, для какого полушария количество джетов превосходит их количество в другом. Наблюдется два пика общего количества джетов: в 2011 для северного полушария и в 2013 для южного.

Как было отмечено выше, полярные магнитные поля часто не меняют знак одновременно, и 24 цикл СА имел два пика и северо-южную асимметрию во времени смены знака на полюсах. Для сравнения использовалось число пятен в каждом полушарии как индикатор конфигурации глобального магнитного поля, что отражено на Рисунке 7 (справа) по тому же принципу, что и для джетов (Рис 7, справа). Наблюдается хорошее согласование между максимумами для джетов и пиками для солнечного цикла: максимум для северного полушария для джетов был вблизи первого пика для пятен и смена знака магнитного поля произошла в 2011 [Lowder et al., 2017; Mordvinov and Yazev, 2014], тогда как пик для южного полушария для джетов начинался вблизи 2014, близко ко второму пику для цикла СА и процессом смены знака на южном полюсе [Golubeva and Mordvinov, 2017]. Хотя в южном полушарии полярное магнитное поле окончательно сменило знак только к 2015 году, все равно получена хорошая согласованность. Преобладание количества джетов в северном полушарии в минимуме 23-24 цикла СА было также подтверждено в работе [Nistico et al., 2009]. [Svalgaard and Kamide, 2013] подтвердили, что наличие двух пиков для СА является обычным случаем и асимметричность СА является следствием асимметричности цикла.

Изменения в угловом распределении джетов должно быть тесно связано с механизмом их формирования. Прослеживание пути джетов от области зрения коронографов COR2/STEREO до нижних слоев короны выходило за рамки поставленной задачи, но было проведено сравнение их характеристик с изменениями границ ПКД. Как уже отмечалось во Введении, источники джетов многочисленны и разнообразны, и некоторыми из них являются КД и их границы [Wang et al., 1998b; Wang and Sheeley, 2002]. КД на полюсах практически исчезают к максимуму цикла СА. [Lowder et al., 2017] проанализировал распределение КД и отметил их асимметричность для северного и южного полюсов: почти не



присутствуют КД в северном полушарии после 2011, а в южном - после 2013 года. Эволюция КД была детально исследована в работе [Hamada et al., 2018]. Согласно их многоволновым наблюдениям, северная ПКД исчезла в 2011, а южная в 2013. Как видно на Рисунке 5, джеты сконцентрированы в диапазоне  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  и исчезают в диапазоне  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  после 2012 года для обоих полюсов, но такой асимметрии как в [Lowder et al., 2017] не наблюдается. Рисунок 5 показывает более резкие изменения в северных областях солнечной короны, по сравнению с южными, что можно объяснить не окончательной завершенностью процесса смены знака магнитного поля на южном полюсе к 2014 году. Кроме того, смазанная картина углового распределения джетов для южного полюса может быть связана со структурой южной ПКД. Но эти допущения требуют отдельного рассмотрения. Изменения джетов в диапазоне  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  незначительны для анализа, потому что возможно связать события в этом диапазоне со смежными диапазонами углов. [Paraschiv et al., 2010] исследовал общее угловое распределение и обнаружил, что распределение джетов в максимуме солнечного цикла (2007-2008 гг.) имеет максимум вблизи  $0^{\circ}$  и  $180^{\circ}$  относительно других позиционных углов. Отличие их результата от полученного в данной работе может быть объяснено постановкой задачи и предметом исследования: здесь рассматривались только полярные области, без экваториальных.

Таким образом, солнечный цикл (и динамика полярного магнитного поля) оказывает значительное влияние на характеристики наблюдаемых джетов.

### **1.5 Определение возможных источников джетов**

Отдельно была рассмотрена задача определения возможных источников джетов. Для этого использовались данные наблюдений отдельных джетов в низкоширотных областях солнечной короны. Использовались два подхода: стереоскопия и расчет меры эмиссии.

Принцип стереоскопии заключается в комбинации двух изображений изучаемого объекта с разных точек в пространстве. Расположение КА STEREO в

определенные моменты времени позволяет применять этот метод для трехмерного изучения различных корональных структур при комбинации изображений с двух спутников или с привлечением данных других космических обсерваторий. Также этот метод позволяет вычислить гелиографические координаты проекции корональной структуры на поверхность Солнца. Для реализации стереоскопического метода использовались данные наблюдений джетов в экваториальных областях одновременно с двух спутников с использованием пакета программ для обработки данных STEREO. На Рисунке 8 приведен интерфейс программного обеспечения `scc_measure.pro` из библиотеки SolarSoft [SSW], разработанной специально для данных STEREO.

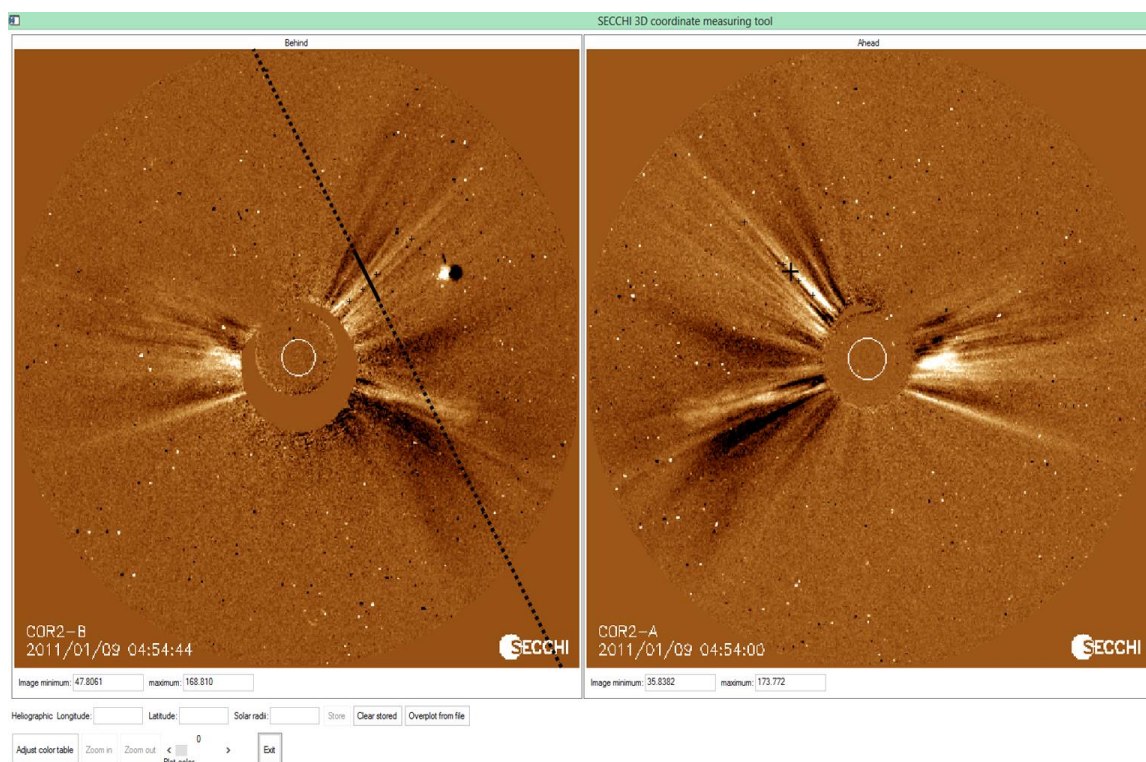


Рисунок 8. Снимок экрана с окном программы из библиотеки SolarSoft. На левой панели изображение, полученное COR2/STEREO-B, черной линией показана экиполярная плоскость, проведенная через точку, отмеченную на правой панели на данных COR2/STEREO-A.

Необходимо загрузить два изображения с разных спутников, затем на одном изображении поставить метку на интересующую структуру (Рисунок 8, правая панель) и на втором изображении отобразится экиполярная плоскость (Рисунок 8, левая панель), соответствующая метке на первом изображении. Визуально можно оценить, насколько точно построена плоскость, т.е. насколько она соответствует исследуемой структуре, и перестроить ее при необходимости. Соотнеся видимую структуру на одном изображении со структурой, расположенной на экиполярной плоскости, на другом изображении, можно определить соответствующие гелиографические координаты. Они отображаются в поле внизу окна. Было проведено несколько измерений для каждого случая и вычислено среднее арифметическое для каждой пары гелиографических координат.

Яркая черно-белая точка является артефактом и соответствует планете или противоположному КА STEREO. Для увеличения контрастности и облегчения идентификации джетов предварительно были получены разностные изображения.

В дальнейшем полученные координаты сопоставлялись с соответствующими им корональными структурами на данных AIA/SDO (Рисунок 9).

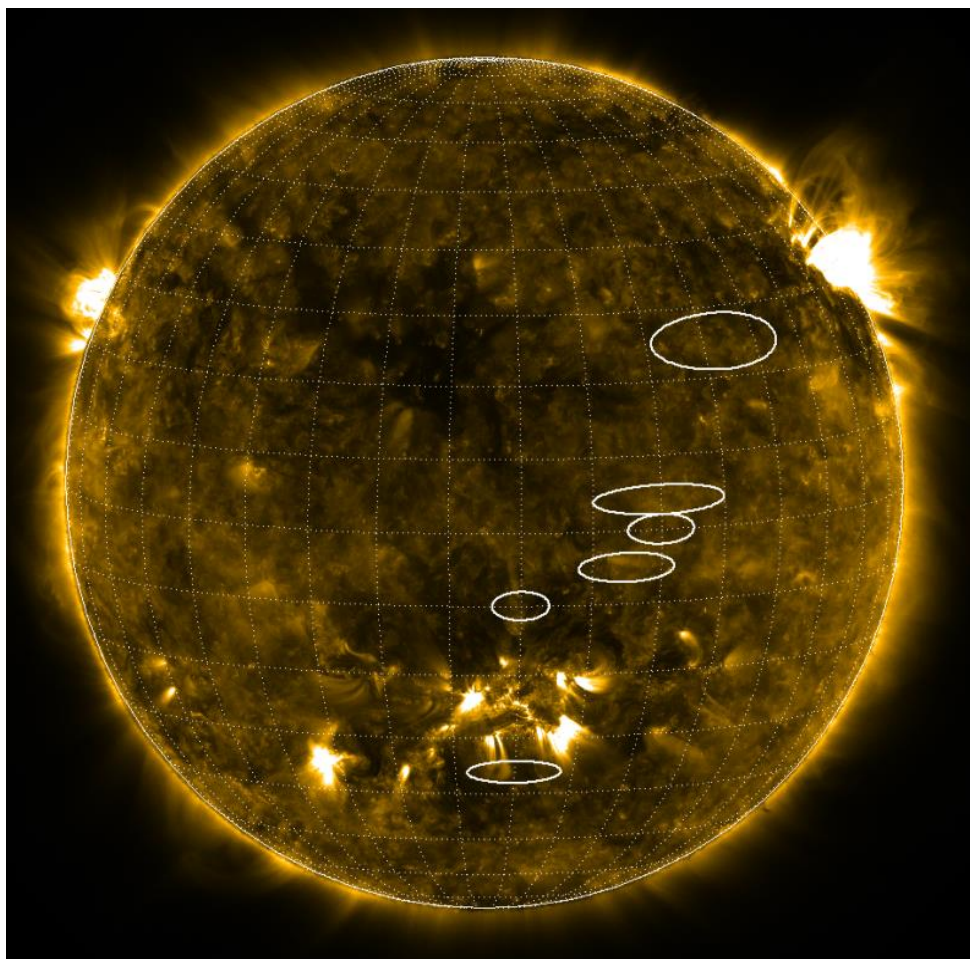


Рисунок 9. Изображение солнечной короны, полученное на длине волны 171 Å КА AIA/SDO. Белыми овалами отмечены области вероятного формирования джетов.

Как видно на изображении AIA/SDO, полученные гелиографические координаты указывают на различные участки солнечной поверхности: и участки спокойного Солнца, и границы КД, и структуры вблизи АО. Как было отмечено во Введении, формирование джетов может происходить в результате небольших магнитных пересоединений, схожими с процессами в АО после KBM [Song et al., 2012]. В этом случае границы КД, шлемовидные и веерные структуры над яркими точками и рядом с АО также могут формировать джеты путем магнитного пересоединения и единственное необходимое условие для их наблюдения на значительных расстояниях – наличие магнитного поля открытой конфигурации, чтобы джет мог перемещаться от поверхности Солнца на достаточно далекие расстояния.

Во втором случае метод определения источника джетов строится на предположении, что происходит активный вынос вещества из КД в межпланетное пространство, увлекающий за собой сгустки плазмы. Для оптически тонкого излучения плазмы, находящейся в термодинамическом равновесии, распределение плазмы, находящейся на луче зрения может быть описана дифференциальной мерой эмиссии (DEM – differential emission measure). Она определяется как (2):

$$DEM = n(T)^2 \frac{dh}{dT}, \quad (2)$$

где  $n$  - плотность, зависящая от температуры  $T$  вдоль луча зрения. Измеренная интенсивность  $I_\lambda(T)$  для конкретного фильтра AIA соотносится с DEM как (3):

$$I_\lambda = \int_T K_\lambda(T) DEM(T) dT, \quad (3)$$

где  $K_\lambda(T)$  обозначает функцию отклика инструмента (instrument response), зависящую от содержания элементов, распределения температуры излучающей плазмы и чувствительности инструмента. На инструменте AIA/SDO канал 193 Å центрирован на излучение в линии железа FeXII, XXIV что соответствует короне и горячей вспышечной плазме [Lemen et al. 2012]. Функция отклика конкретного фильтра была получена при помощи процедуры `aia_get_response.pro` из библиотеки SolarSoftware [SSW]. Для вычисления DEM по данным AIA применялась техника, описанная в [Plowman, 2013], чтобы восстановить кривую DEM для каждого пикселя. Температурный диапазон для DEM, получаемой данным методом, составляет от 0.4 до 31 МК. Однако, высокие температуры на участках спокойного Солнца и в КД отсутствуют. Поэтому, диапазон температур в КД был от 0.4 до 2 МК. Интегрирование DEM по всему температурному диапазону дает меру эмиссии  $EM$  (4):

$$EM = \int_T DEM(T) dT. \quad (4)$$

Значения меры эмиссии  $EM$  в КД варьируются в диапазоне  $10^{24}$ - $10^{26}$  см<sup>-5</sup>.

Для детального анализа было выбрано конкретное событие 13 февраля 2012 года, когда наблюдалась экваториальная КД, обращенная в сторону Земли, а КА STEREO-B наблюдал потоки солнечного ветра, распространяющиеся в картинной

плоскости или очень близко к ней также в направлении на Землю. Известно, что КД являются участками солнечной атмосферы с пониженной плотностью и силовыми линиями магнитного поля открытой конфигурации, которые могут позволить удалиться наблюдаемому джету на достаточное расстояние от поверхности Солнца. В пределах участка солнечной атмосферы, содержащего КД, 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 вблизи наблюдаемой в КУФ-диапазоне на длине волны  $193 \text{ \AA}$  границы КД. Расположение этой области соответствовало позиционному углу джета, наблюдаемого коронографом COR2/STEREO (Рисунок 10).

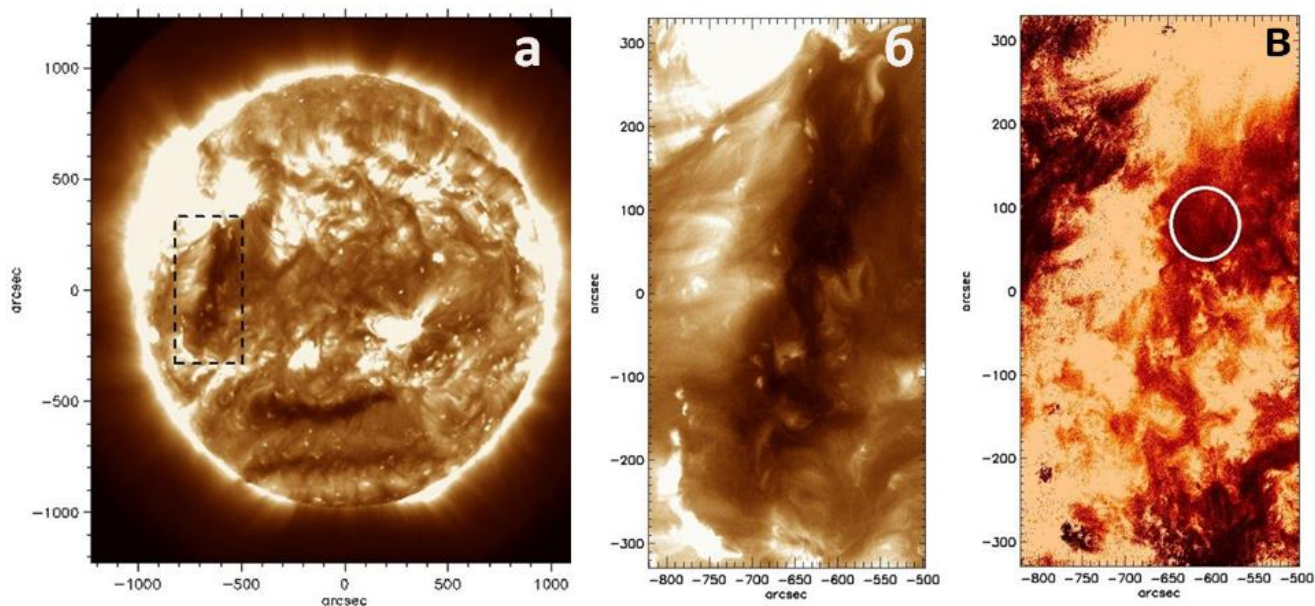


Рисунок 10. а) изображение Солнца по данным AIA/SDO на длине волны  $193 \text{ \AA}$ . Пунктиром показана область солнечной короны с экваториальной КД; б) отдельно показан участок солнечной атмосферы с КД. Наблюдается неоднородность внутренней структуры КД; в) отображение общей меры эмиссии по всему температурному диапазону для выделенного участка, выраженное в  $\text{см}^{-5}$ .

Структура КД внутри неоднородна: присутствуют яркие точки, веерные структуры, области пониженной и повышенной концентрации плазмы (Рисунок 10, панель б). При анализе выделенной КД был обнаружен только один участок с низкой концентрацией плазмы, располагающийся вблизи северной границы КД и совпадающий с позиционным углом, на котором наблюдался джет (Рисунок 10, панель в).

В процессе определения наиболее вероятных областей формирования джетов было установлено, что они формируются на границах КД, вблизи ярких точек на поверхности спокойного Солнца и вблизи веерных структур, что согласуется с результатами других работ.

## Выводы Главы 1

В результате проведенного исследования были обнаружены джеты в потоках солнечного ветра по данным коронографа COR2/STEREO. Они наблюдались в период с 2009 по 2014 год в полярных и экваториальных областях солнечной короны и имели размеры от 1 до 3 солнечных радиусов в продольном направлении. Получено, что количество джетов, а также их характеристики, значительно изменяются с течением цикла СА. Природа возникновения джетов, их вклад в солнечный ветер до конца не изучены, но проведенное исследование и сравнение с результатами влияния солнечного цикла на другие проявления СА позволяет заключить, что джеты также являются одним из видов проявления СА.

Обнаружена северо-южная асимметрия в количестве джетов в полярных областях солнечной короны.

Выявлена закономерность изменения количества наблюдаемых джетов в зависимости от фазы цикла солнечной активности.

Проанализировано угловое распределение джетов относительно оси север-юг с течением времени.

Построены распределения значений проекций скоростей на картинную плоскость для северных и южных полярных областей по отдельности для каждого года наблюдений. Обнаружены изменения в форме распределений с течением времени и в значениях максимальных наблюдаемых проекций скоростей для каждого полюса.

Установлено, что возможные области формирования джетов располагались вблизи участков с открытой компонентой конфигурации магнитного поля.



## Глава 2. ИНЛ как предвестник вспышек класса X по многоволновым данным нового инструмента SRG

Глава 2 посвящена изучению источника над линией инверсии магнитного поля как предвестнику мощных солнечных вспышек по многоволновым данным Сибирского радиогелиографа.

### **2.1 Предмет исследования и ранее полученные результаты**

Наземные радиотелескопы и внеатмосферные обсерватории, наблюдающие Солнце в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, предоставили возможность детального изучения структуры АО независимо от погодных условий. Наблюдения в микроволновом диапазоне с высоким пространственным и временным разрешением, позволяющие сделать анализ спектра и поляризации источников излучения, дают информацию о механизмах излучения, параметрах плазмы и областях накопления энергии. Все эти данные характеризуют развитие АО и эволюцию ее конфигурации. Исследователи выделяют различные предположения о признаках готовящейся солнечной вспышки: конфигурация магнитных полей в АО [Ишков, 1998], радиогелиографический критерий [Максимов и др., 1996] оценка свободной магнитной энергии, критерий Танаки-Эноме, основанный на характеристиках интегрального радиоизлучения АО [Tanaka et al., 1975], явления уярчения, инверсии и понижения поляризации перед мощными вспышками [Bogod et al., 2003]. Еще одним таким критерием является наличие компактного микроволнового источника над линией инверсии фотосферного магнитного поля, часто называемого NLS - Neutral Line associated Source (ИНЛ - Источник над Нейтральной Линией). Вообще, в АО наблюдаются два вида долгоживущих микроволновых источников. Первый - это стационарные пятенные источники с тепловым гирорезонансным механизмом излучения. Их

излучение имеет круто спадающий с ростом частоты спектр плотности потока, т.к. излучательная способность и оптическая толщина гирорезонансных уровней, соответствующих наблюдаемому микроволновому излучению, быстро растут с увеличением температуры плазмы. Второй - квазистационарные источники, располагающиеся над линией инверсии полярности фотосферного магнитного поля (PIL – polarity inversion line), которые, в свою очередь, делятся на два типа. К первому типу относятся слабо поляризованные диффузные источники небольшой яркости, всегда появляющиеся при выходе на поверхность биполярных магнитных структур. Их оптически тонкое излучение определяется кулоновскими столкновениями частиц горячей плазмы, заполняющей магнитные петли. А ко второму относятся как раз ИНЛ. Первые признаки связи между особенностями излучения и вспышечными событиями были получены в 1970-х годах [Quinones et al., 1975] при наблюдении солнечного затмения на длине волны 4.5 см. Затем по наблюдениям на Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) на длине волны 6 см были обнаружены квазистационарные яркие радиоисточники, проецирующиеся на линию инверсии фотосферного магнитного поля [Kundu et al., 1977]. Возникновение в областях близких магнитных полей противоположной направленности и усиление радиоизлучения NLS перед вспышкой отмечено в работе [Kundu and Alissandrakis, 1984], где авторы ассоциируют микроволновый источник с арочной системой волокна и предлагают интерпретировать его как гирорезонансное излучение нетепловых электронов. [Somov, 1986] интерпретировал нагрев плазмы в области микроволнового источника, как проявление пересоединения магнитных линий в токовом слое, приводящее к нагреву плазмы и ускорению частиц в начальной стадии вспышки. Согласно многоволновым измерениям на РАТАН-600, типичные размеры таких источников 10-30", яркостная температура до 10 МК на длине волны 4 см, а процент круговой поляризации не превышает 30%. Совместный анализ магнитограмм и многоволновых данных РАТАН-600 для нескольких вспышечных событий показал наличие компактного радиоисточника в АО с  $\delta$ -конфигурацией магнитного поля,

связанной с новыми всплывающими магнитными потоками, а также с вращением пятен относительно друг друга. Указанные факторы определяют непотенциальную составляющую и спиральность магнитного поля АО. Изменения в спектре потока излучения от радиоисточника, проявляющиеся как увеличение скорости роста потока с длиной волны в диапазоне 2-5 см и появление локального максимума на 3 см, обнаруживаются за 1-2 дня до вспышки и свидетельствуют о появлении ИНЛ в АО [Borovik et al., 2012].

ИНЛ появляются в области наибольшего сближения солнечных пятен противоположной полярности и являются основными источниками микроволнового шума АО. Такое сближение на фотосферных магнитограммах может выглядеть как столкновение всплывающих биполярных магнитных потоков или друг с другом, или с уже существующими. Широкие и вращательные движения фотосферной плазмы часто сопутствуют этому процессу и способствуют повышению напряженности магнитного поля на линии раздела полярности. Важную роль играет то, что наблюдаемые на высоких частотах ИНЛ, присутствуют в АО, производящих рентгеновские вспышки балла X, в противном случае возможны вспышки только класса M. Появление ИНЛ опережает мощную вспышку или начало серии таких вспышек на время от нескольких часов до двух суток. Он восстанавливается после вспышки и существует, пока продолжается серия вспышек балла X. Более того, излучение вспышки может начинаться в области расположения ИНЛ.

Несмотря на все вышесказанное, природа ИНЛ до сих пор остается неясной. Измерения на РАТАН-600 дают информацию о спектре излучения на нескольких частотах сразу, но возникает неоднозначность позиционирования излучения, т.к. данные одномерны. Радиогелиографы Нобеяма и ССРТ предоставляли двумерные данные, но только для одной-двух частот и не всегда могут одновременно наблюдать вспышку. Для полноценного анализа ИНЛ необходимо наличие регулярных многоволновых двумерных данных для однозначного определения местоположения источников радиоизлучения и получение спектра.

На данный момент Сибирский радиогелиограф [Лесовой и др., 2017; Алтынцев и др., 2020] предоставляет уникальную возможность такого анализа. На момент проведения исследования были доступны только данные макета СРГ-48.

## 2.2 Инструменты и данные

Для получения данных в микроволновом диапазоне использовались данные двух радиотелескопов: макета Сибирского Радиогелиографа (СРГ-48) и Радиогелиографа Нобейма. Для определения положения нейтральной линии магнитного поля использовались данные магнитограмм HMI/SDO.

Сибирский Радиогелиограф (СРГ) построен на базе Сибирского Солнечного Радиотелескопа (ССРТ), расположенного в урочище Бадары в республике Бурятия (Рисунок 11).



Рисунок 11. Макет Сибирского радиогелиографа (СРГ-48).

Радиотелескоп проводит наблюдения Солнца в течение всего светового дня: проводятся с 00 до 10 UT летом и с 02 до 08 UT зимой. На момент исследуемых событий был построен и функционировал только 48-антенный макет СРГ - СРГ-48, наблюдающий Солнце с лета 2016 до 2021 года на 5 частотах (4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5) в диапазоне от 4 до 8 ГГц с шириной канала 10 МГц. Накопление сигнала на каждой частоте составляет 0.28 с, переключение с одной частоты на другую - около 2 с. С

технической точки зрения, СРГ-48 представляет собой Т-образный интерферометр, состоящий из 48 антенн диаметром 1.8 м (Рисунок 12). Изображения Солнца получаются методом Фурье-синтеза.

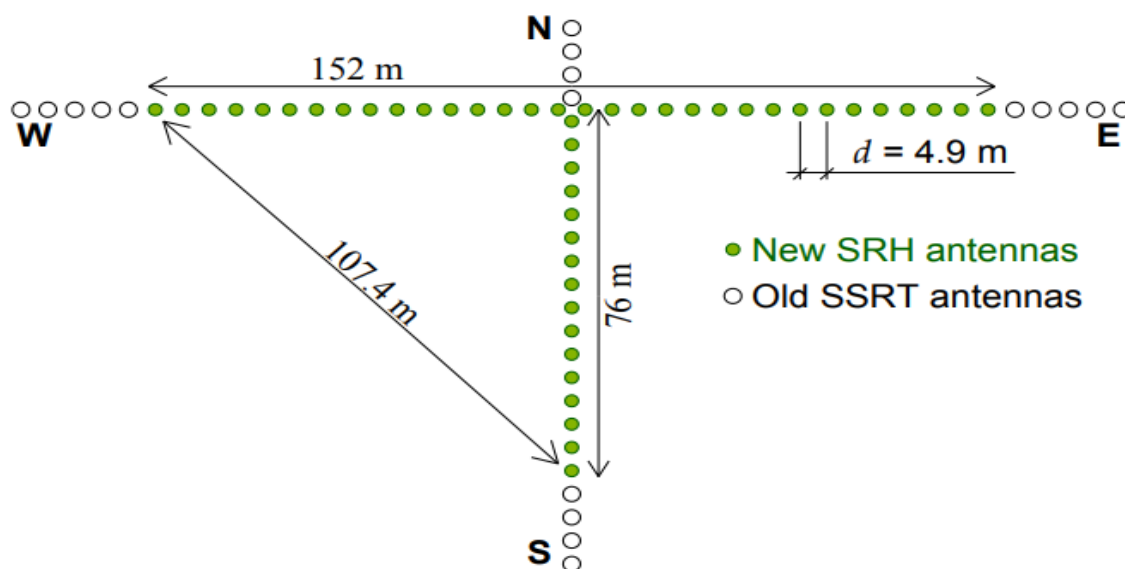


Рисунок 12. Схема антенн СРТ и СРГ-48.

Максимальная база составляет 107.4 м, пространственное разрешение достигает 70" на 8 ГГц. Помимо изображений полного диска Солнца, предоставляются данные о плотности потока радиоизлучения в виде корреляционных кривых, представляющих собой сумму кросс-корреляционных сигналов от всех пар антенн [Лесовой и Кобец, 2017;SRH corrplot] (Рисунок 13).

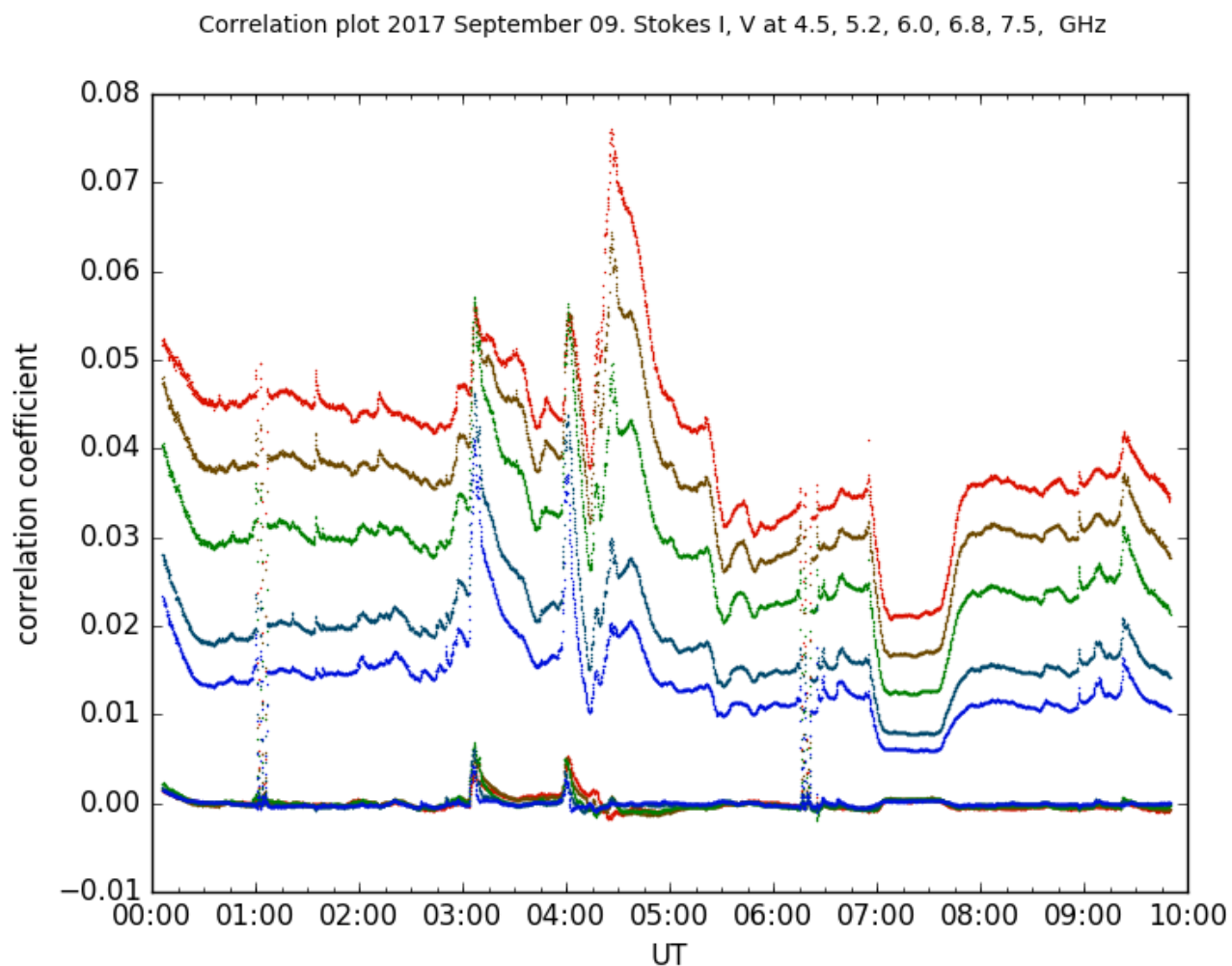


Рисунок 13. Пример представленных на сайте корреляционных кривых, полученных СРГ-48. Верхние 5 графиков отражают изменения параметр Стокса I (интенсивности), нижние, вблизи 0 оси ординат, соответствуют изменениям параметра Стокса V (поляризации).

Отличительной особенностью СРГ-48 является высокая чувствительность прибора к изменениям потока излучения составляет  $10^{-4}$  с.е.п.. Измеряются левая и правая круговые поляризации, для получения параметров Стокса I, V необходимо использовать пакет программ, разработанный в ИСЗФ для обработки данных СРГ. На высоких частотах происходит наложение сигнала антенн друг на друга, что может приводить к ошибкам при определении источников на диске.

Данные СРГ-48 представлены в формате FITS как для корреляционных кривых, так и для изображений. Для корреляционных кривых FITS-файл

представляет собой бинарную таблицу, в которой записаны дата наблюдений, время, инструмент, сокращенное название Института, географические координаты обсерватории, ширина канала в МГц, номера частот и время для обоих параметров Стокса I и V. Пример отдельного отображения данных для интенсивности и поляризации представлен на Рисунке 14.

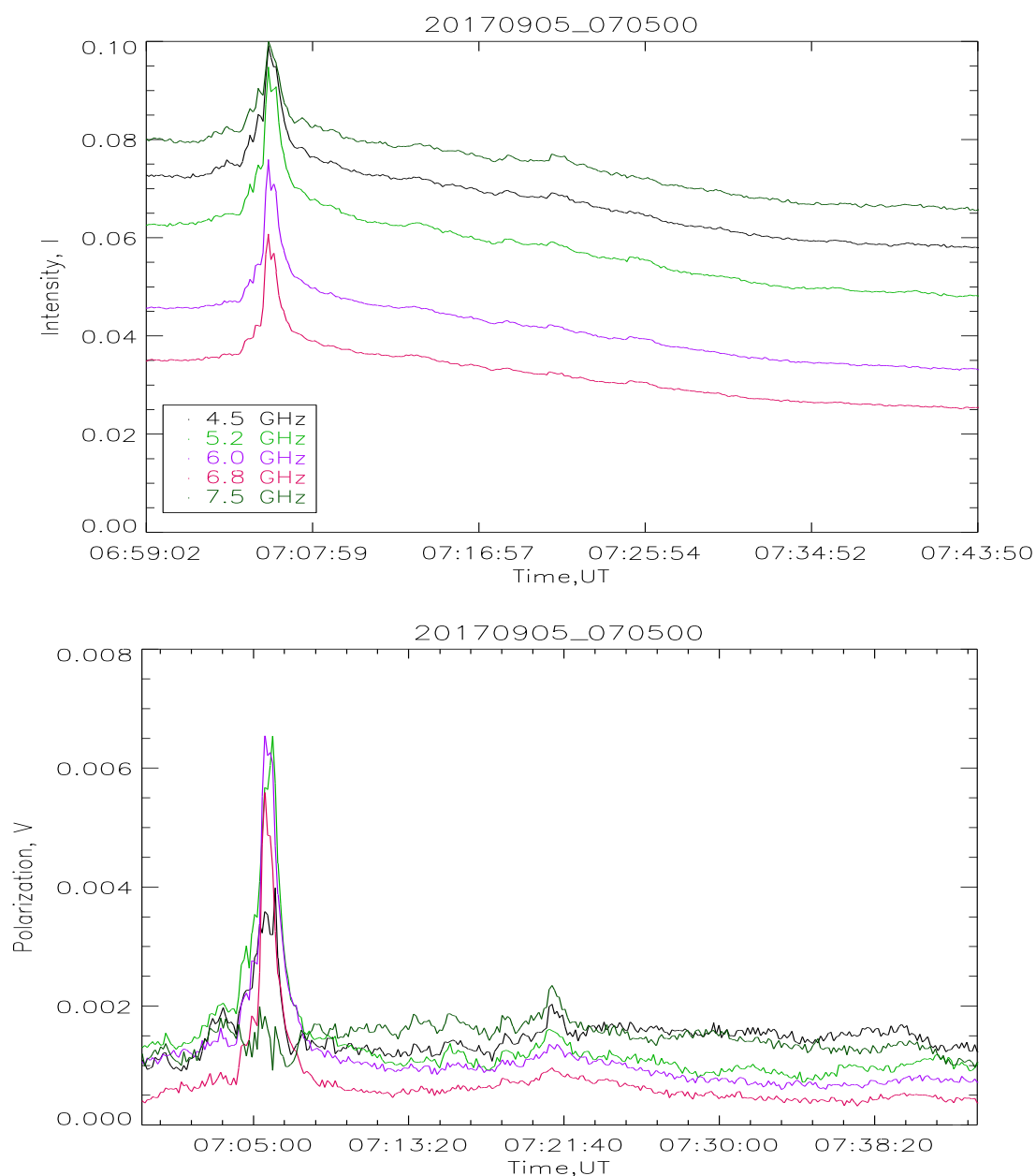


Рисунок 14. Представлен участок корреляционных кривых для данных, полученных SRG-48 для даты 05 сентября 2016 года. На верхнем рисунке - интенсивность, на нижнем - поляризация. По оси абсцисс отложено время UT (чч:мм:сс), по оси ординат в логарифмическом масштабе безразмерные коэффициенты корреляции для интенсивности и поляризации.

Первичные FITS-файлы (raw data), полученные с инструмента, содержат данные о нескольких измерениях, дате наблюдений, среднем времени всех записей, инструменте, сокращенном названии Института, географических координатах



обсерватории, ширине канала в МГц, амплитуде принятого сигнала, значениях видностей для правой и левой поляризаций, информацию о геометрии антенн. После первоначальной обработки и построения изображений в правой и левой поляризациях формируется FITS-файл (уровень обработки 0.5), содержащий информацию о размере изображения в пикселях, центре изображения, весе пикселя в угловых секундах, дате и времени наблюдения, поляризации, частоте в ГГц. Пример такого изображения приведен на Рисунке 15.

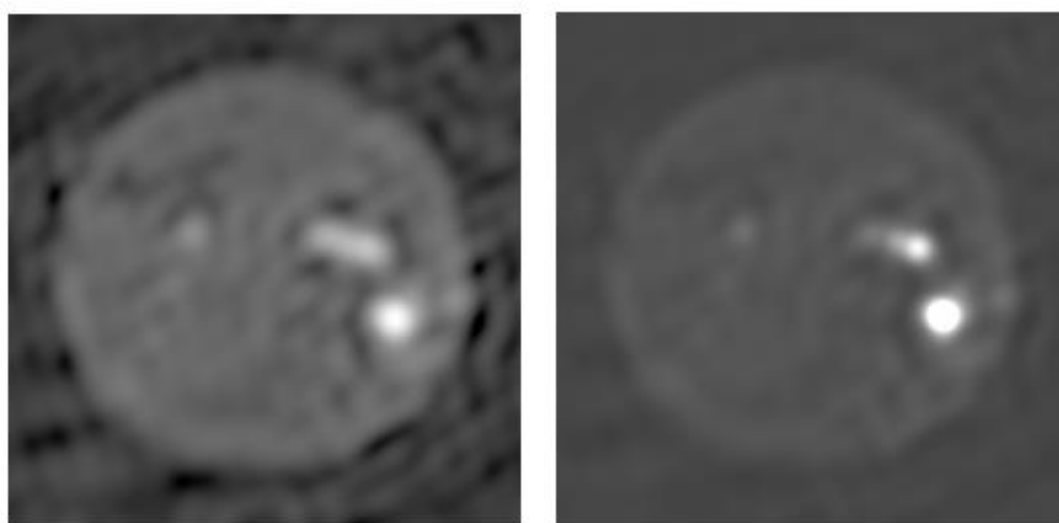


Рисунок 15. Пример изображений Солнца в левой (слева) и правой (справа) поляризации для частоты 4.5 ГГц 2017-09-07 04:40:10 UT.

На момент исследуемых событий были доступны данные Радиогелиографа Нобейма на частоте 17 ГГц. Радиогелиограф представлял собой E-образный телескоп, состоящий из 84 80-см параболических антенн, с общей длиной базы 490 м в направлении восток-запад и 220 м в направлении север-юг [Nakajima et al., 1994].

Для анализа доступны изображения полного диска Солнца в микроволновом диапазоне на двух частотах 17 и 34 ГГц с пространственным разрешением примерно 10" и 5" соответственно. Временное разрешение составляет 1 с для обычных наблюдений и 0.1 с для записи отдельных событий. Радиотелескоп

наблюдает Солнце с 22:50 UT до 06:20 UT. Параметр Стокса I может быть вычислен для обеих наблюдательных частот, параметр Стокса V - только для частоты 17 ГГц. Для анализа использовались FITS-файлы с параметрами Стокса I и V из архива данных, доступных по адресу в сети Интернет [NoRH data].

Инструмент HMI на КА SDO, описанном в Главе 1, измеряет Доплеровское смещение в спектральной фотосферной линии FeI 6173 Å для определения скоростей плазмы на поверхности Солнца с временным разрешением 45 с и пространственным разрешением 1". Для получения данных о продольном магнитном поле (измеренном вдоль луча зрения - LOS магнитограмма) и карты векторного магнитного поля (векторная магнитограмма) используется эффект Зеемана для той же спектральной линии. Временное разрешение для LOS магнитограммы составляет 45 с, пространственное - 1". Векторные магнитограммы имеют временное разрешение 12 мин с точностью поляризации не менее 0.3% [Scherrer et al., 2012].

Так как SRG-48 был запущен в конце 24 цикла СА, то для многочастотного анализа была доступна только одна АО –12673.

### **2.3 Особенности формирования и эволюции АО 12 673**

АО 12673 имела сложную магнитную конфигурацию, вкрапления полей противоположной полярности и взаимосвязь системы корональных петель с окружающими магнитными полями. NOAA 12673 появилась на восточном лимбе 28 августа как одиночное  $\alpha$ -пятно, диаметр тени которого не превышал 10". Обычно напряженность магнитного поля в солнечных пятнах такого размера не превышает 3500 Гс и на радиоизображениях проявляется на частотах только ниже 8 ГГц. Третьего сентября начался интенсивный выход новых биполярных магнитных потоков, расширение которых привело 4 сентября к столкновению их западного края с существовавшим  $\alpha$ -пятном, его обтеканию и образованию  $\delta$ -конфигурации. Само же  $\alpha$ -пятно при этом не сдвинулось с места. Также с 4 сентября излучение АО стало фиксироваться на частоте 17 ГГц. Вновь

всплывающие потоки сталкивались с уже существующим, что вместе с шировыми движениями привели к значительному увеличению напряженности магнитного поля и поджатия магнитных потоков внутри  $\delta$ -конфигурации. Следствием этого явилось необычно высокое значение напряженности фотосферного магнитного поля — 5570 Гс [Wang et al., 2018], практически полностью сосредоточенное в поперечной составляющей на линии инверсии полярности. Наличие в NOAA 12673 значительных магнитных потоков со столь высокой напряженностью объясняет появление на частоте 34 ГГц квазистационарного компактного источника с яркостной температурой около 0.4 МК в окрестности нейтральной линии фотосферного магнитного поля. Численное моделирование магнитной структуры и гирорезонансного излучения NOAA 12673 показало соответствие расположения наблюдавшегося на частотах 17 и 34 ГГц ИНЛ необычно высоким значениям напряженности магнитного поля на уровне фотосферы [Anfinogentov et al., 2019].

В целом с 4 по 10 сентября эта суперактивная область являлась источником четырех вспышек балла X (в том числе самой сильной вспышки 24 цикла SA – X9.3), множества вспышек балла M, интенсивных протонных потоков, сильной магнитной бури 7–9 сентября с  $Dst = -124$  нТл, значительного форбуш-понижения и наземного возрастания интенсивности космических лучей 10 сентября. Неоднозначная система взаимосвязи корональных петель, магнитных жгутов, токовых слоев и сопутствующие им процессы энерговыделения требуют тщательного и последовательного анализа АО. В работе [Боровик, 2018] на основе анализа одномерных сканов РАТАН-600 было выдвинуто предположение, что основным компонентом квазистационарного излучения NOAA 12673 стал ИНЛ после 5 сентября. Сильные магнитные поля данной АО могли внести искажения в оценку полного потока излучения, поэтому требовалось уточнение местоположение источника радиоизлучения по двумерным данным.

## 2.4 Методология идентификации источника

ИНЛ часто похож на обычный пятенный радиоисточник, т.к. появляется вследствие сближения разнополярных пятен, и может примыкать к нему, что затрудняет идентификацию ИНЛ. Прямое сопоставление микроволновых изображений с наблюдаемыми продольными фотосферными магнитограммами также не всегда позволяет надёжно распознать ИНЛ из-за проекционного смещения линии инверсии внутри АО. Для устранения этой неопределенности [Rudenko, Rudenko, Uralov, 2007] был разработан метод идентификации ИНЛ, основанный на расположении ИНЛ в области максимума тангенциальной составляющей магнитного поля АО или близко к ней. Необходимо провести сопоставление ИНЛ и рассчитанного распределения составляющих коронального магнитного поля на заданном высотном срезе атмосферы АО [Уралов, 2006; Uralov et al., 2006]. Для сопоставления использовались результаты расчета магнитного поля, полученные на основе метода оптимизации для бессилового приближения [Wheatland et al., 2000] в реализации [Rudenko, Myshyakov, 2009]. Данный метод заключается в последовательном преобразовании исходного поля в ограниченной области пространства к нелинейному бессиловому полю в соответствии с граничными условиями [Rudenko, Myshyakov, 2009]. Такое приближение квазистационарных состояний магнитных структур оправдано в областях короны с преобладанием магнитного давления над газокINETическим ( $\beta \ll 1$ ). Полученная таким образом информация о трехмерной структуре магнитного поля позволяет рассчитать физические характеристики, например, энергию и электрические токи.

Электрические токи будут индуцироваться в короне, в которой магнитные поля вмерозены, и оказывая влияние на магнитное поле и обеспечивая накопление магнитной энергии в АО. Предполагается, что конфигурация магнитного поля с электрическими токами является вероятным предвспышечным состоянием в активных областях. Динамика или нестабильность в этих конфигурациях будет определять эволюцию АО.

Преимущества используемого метода и его применение для реконструкции коронального магнитного поля подробно описаны в работах [Rudenko, Myshiakov, 2009]. В качестве граничных условий использовались векторные магнитограммы SDO/HMI с устраненной  $\pi$ -неопределенностью. В некоторых пикселях используемых магнитограмм присутствует перенасыщение и другие инструментальные эффекты, поскольку во время некоторых вспышек балла X максимальная напряженность фотосферного магнитного поля в АО 12673 превышала предельную величину 5000 Гс, до которой данные магнитограмм SDO/HMI могут считаться надежными. Для частичного нивелирования влияния этого недостатка производилось предварительное сглаживание исходных магнитограмм.

Первым этапом идентификации ИНЛ является совмещение полученных радиокарт с магнитограммами продольного магнитного поля. При положительном результате проводится уточнение местоположения радиоисточника путем совмещения радиокарт с рассчитанным распределением магнитного поля на заданной высоте в АО. Ограничением метода является условие на отсутствие сильных радиовсплесков в момент наблюдения. Как было показано в работах [Уралов и др., 2006; Uralov et al., 2006], центр яркости ИНЛ располагается в тех местах нейтральной линии вертикальной составляющей магнитного поля, где горизонтальная составляющая максимальна. Поскольку пространственное разрешение SRG-48 небольшое, требовалась верификация ИНЛ, обнаруженного по данным SRG-48. Такая верификация проводилась при помощи данных Радиогелиографа Нобеяма на 17 ГГц.

Полученные SRG-48 изображения в левой и правой поляризации совмещались для получения параметров Стокса I и V. Затем последовательно совмещались радиоконтур, полученные SRG-48 и Радиогелиографом Нобеяма, с источниками на магнитограммах продольного магнитного поля, полученных HMI/SDO. Поскольку яркость АО 12673 была значительной, и присутствовали инструментальные эффекты, совмещение изображений происходило по соседним

АО, имеющим компактные размеры и небольшую напряженность магнитного поля, не дававшее искажения изображения боковыми лепестками диаграммы направленности радиотелескопа. Эта процедура была повторена для каждого дня наблюдения АО 12673 на диске Солнца.

## **2.5 Анализ наблюдения АО**

В период работы SRГ-48 для анализа был доступна только АО 12673, ее описание приведено в начале этой главы. Были проанализированы радиокарты на частотах 4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5 и 17 ГГц для дней наблюдения с 4 по 8 сентября. Для сопоставления с магнитограммами использовались изображения за 5, 6, и 7 сентября 2017 года, когда АО находилась ближе к центру диска и не было значительных искажений для измеренного магнитного поля.

На Рисунке 16 показан первый этап идентификации ИНЛ: суперпозиция радиоизображений NOAA 12673, полученных 6 сентября, и продольной магнитограммы. Аналогичные суперпозиции за 5 и 7 сентября принципиально не отличаются от набора на Рисунке 16 и поэтому не показаны.

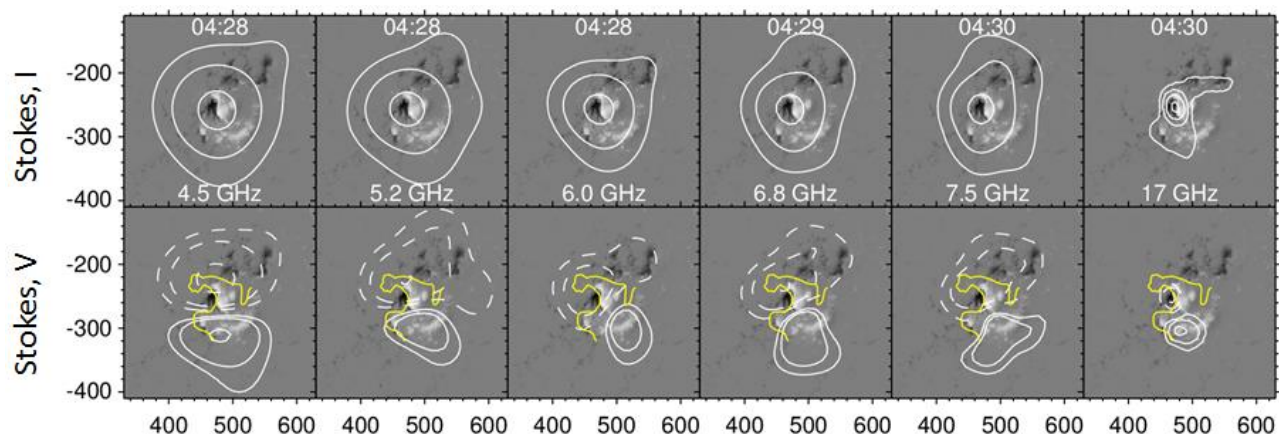


Рисунок 16. ИНЛ в NOAA 12673 6 сентября за 4.5 часа до первой вспышки балла X2.2. Полутоновым фоном представлена фотосферная продольная магнитограмма (04:30; светлый – положительная полярность, темный – отрицательная). Контурные в верхнем ряду – интенсивность, уровни [0.1; 0.3; 0.8] от максимума для SRG и [0.03; 0.1; 0.3; 0.8] для Радиогелиографа Нобейма. Белые контурные в нижнем ряду – круговая поляризация: сплошные – правая; штриховые – левая. Уровни для SRG [0.15; 0.3; 0.8] от максимума каждой полярности, для NoRH – [0.1; 0.3; 0.8]. Желтый контур – нейтральная линия. Координаты указаны в угловых секундах от центра диска Солнца.

Верхний ряд – интенсивность (параметр Стокса I), нижний – круговая поляризация (параметр Стокса V). Левые пять изображений получены SRG на пяти частотах 4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5, ГГц, правое – Радиогелиографом Нобейма на 17 ГГц. Рисунок 16 демонстрирует согласованность радиокарт между собой на всех частотах. Центры яркости источников на всех частотах в интенсивности располагаются в окрестности линии раздела полярностей. В нижнем ряду приведены изображения в поляризации и наблюдается разделение излучения на два источника, соответствующих отрицательной и положительной полярности фотосферного магнитного поля. Однако, наилучшее совпадение центров поляризации с областями магнитного поля разной полярности наблюдается только для данных Радиогелиографа Нобейма на 17 ГГц. Пространственное разрешение и артефакты изображений, вызванных боковыми лепестками диаграммы

направленности СРГ-48, внесли значительные искажения, что привело к неточному совпадению центров поляризации. С учетом расположения источника излучения относительно линии инверсии магнитного поля сделан вывод, что наблюдаемый радиоисточник можно идентифицировать как ИНЛ.

## **2.6 Сравнение восстановленного магнитного поля с положением радиоисточника**

Второй этап идентификации ИНЛ заключался в сравнении полученного двумерного распределения интенсивности компактного радиоисточника, расположенного на определенной высоте над фотосферой, с распределением магнитного поля, полученным для той же высоты. По многолетним результатам исследования на ССРТ и Радиогелиографе Нобеяма было установлено, что ИНЛ должен располагаться на высоте 10-12 Мм для излучения на 5.7 ГГц, а для излучения на 17 ГГц – на высоте 2 Мм.

На Рисунке 17 представлен результат сравнения радиокарт для 6 сентября на частотах 17 ГГц (слева) и 6.8 ГГц (справа) с пространственным распределением магнитного поля на высотах 2 Мм и 10 Мм соответственно.



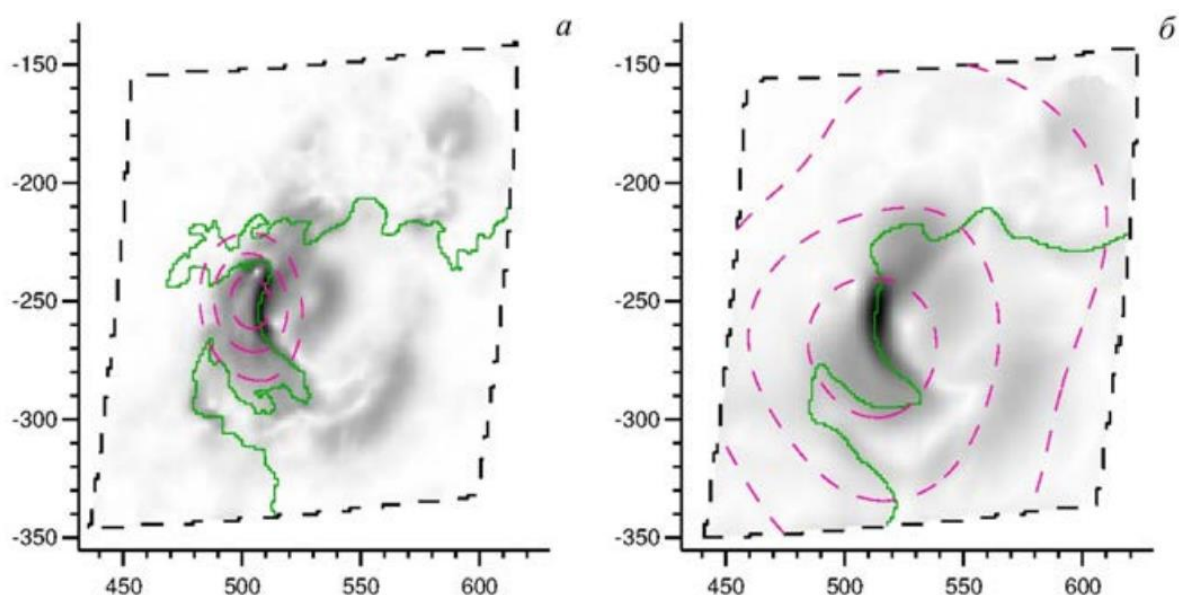


Рисунок 17. Сопоставление положения радиоисточника с распределением восстановленного магнитного поля АО для 6 сентября 2017 года: а) интенсивность по данным Радиогелиографа Нобейма (17 ГГц, высота 2 Мм); б) интенсивность по данным SRG-48 (6.8 ГГц, высота 10 Мм). Пурпурными контурами отмечены уровни [0.1; 0.3; 0.7] от максимума радиояркости. Сплошные зеленые контуры – нулевая линия радиального магнитного поля. Полутонный фон – распределение модуля тангенциальной магнитной составляющей. Штриховая черная линия ограничивает расчетную область. Координаты указаны в угловых секундах от центра диска Солнца.

Все радиокарты преобразованы к времени получения магнитограммы 08:36 при помощи компенсации солнечного вращения без учета высоты радиоисточника, т.к. значения высот существенно меньше размеров диаграмм направленности Радиогелиографа Нобейма и SRG. В обоих случаях максимумы радиояркости находятся вблизи линии инверсии магнитного поля и совпадают с областью максимальных значений тангенциальной составляющей расчетного поля, что подтверждает существование ИНЛ. Положение ИНЛ относительно линии инверсии магнитного поля не менялась с 5 по 7 сентября 2017 года, что указывает

на существование ИНЛ на протяжении всего времени вспышек. При сохранении ИНЛ в АО мощные солнечные вспышки будут продолжаться.

## 2.7 Анализ спектра АО 12673

Так как АО 12673 наблюдалась одновременно на РАТАН-600 и СРГ-48, было проведено сравнение спектров ИНЛ, полученное по данным двух инструментов. На Рисунке 18 приведен спектр идентифицированного по вышеописанной методике ИНЛ по данным СРГ-48 (слева) и результаты, представленные в работе [Боровик, 2018, Рисунок 5, 3 панель] (справа).

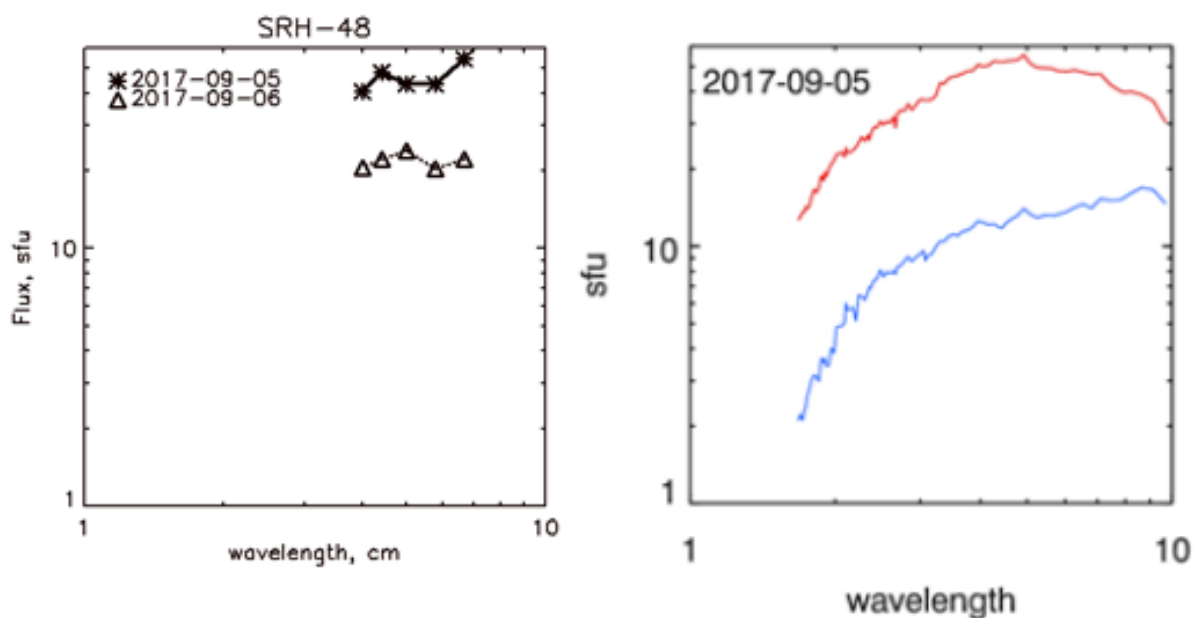


Рисунок 18. а) спектры излучения АО 12673 для 5 и 6 сентября 2017 года по данным СРГ-48; б) рисунок из статьи Боровик, 2018, показывающий спектры АО 12673 (красный график) и АО 12674 (синий график) для 5 сентября 2017 года по данным РАТАН-600.

Для удобства сравнения спектр, полученный по данным СРГ-48 представлен не в ГГц, а в длинах волн. Несмотря на разность методов получения спектров, потоки за 5 сентября хорошо согласуются. Отметим, что 6 сентября поток излучения от ИНЛ стал меньше. Данный факт может быть связан с уменьшением площади источника.

## Выводы Главы 2

В результате проведенного исследования было выявлено наличие микроволнового источника радиоизлучения в диапазоне 4-8 ГГц над линией инверсии магнитного поля в АО 12673, существовавшей на Солнце в сентябре 2017 года. Впервые для определения местоположения ИНЛ использовались двумерные многоволновые данные SRG-48. Для идентификации радиоисточника как ИНЛ были использованы как распределение магнитного поля на уровне фотосферы, так и результаты восстановления профиля распределения магнитного поля на разных высотах. Широкополосность спектрального излучения ИНЛ подтверждено наличием источника радиоизлучения на 17 ГГц по данным Радиогелиографа Нобеяма.

Проведенный анализ подтвердил возникновение ИНЛ в диапазоне 4-8 ГГц перед серией мощных солнечных вспышек. Показана возможность совместного использования многоволновых данных SRG и векторных магнитограмм для заблаговременного выявления ИНЛ.

### **Глава 3. Изучение взаимосвязи между источником квазипериодических пульсаций в микроволновом и дециметровом диапазоне**

#### **3.1 КПП и возможности их использования для диагностики вспышечной плазмы**

Под квазипериодическими пульсациями (КПП) подразумеваются происходящие по гармоническому или близкому к нему закону изменения во временных профилях вспышечного излучения. Такие колебания излучения могут наблюдаться на любом участке вспышечной кривой и во всех диапазонах электромагнитного спектра: белом свете, КУФ, рентгеновском, микроволновом диапазоне, гамма-излучении [Asai et al. 2001; Grechnev et al. 2003; Melnikov et al. 2005; Mariska 2005; Foullon et al. 2005; Inglis et al. 2008; Srivastava et al. 2008; Inglis & Nakariakov 2009; Kaufmann et al. 2009; Zimovets and Struminsky 2009; Nakariakov et al. 2010]. КПП присутствуют как в нетепловом [Kupriyanova et al., 2010], так и в тепловом [Simões et al., 2015] излучении вспышек. [Simões et al., 2015] показал, что в 80% вспышек рентгеновского класса X в 24 цикле СА наблюдались КПП на импульсной фазе и что некоторые КПП также продолжались на фазе спада. Наиболее известный пример КПП – это «семь сестер» – колебания, обнаруженные во временных профилях вспышки 7 июня 1980 г. в нескольких диапазонах с периодом 8 с. [Kane et al., 1983].

Характерные периоды КПП лежат в пределах от долей секунд до нескольких минут. Статистические исследования показали, что типичное количество циклов колебаний составляет от 2 до 10 [Nakariakov et al., 2019]. Стоит отметить, что КПП наблюдаются не только на Солнце, и их изучение открывает широкие возможности для исследования звезд [Pugh et al., 2015].

Обычно КПП разделяют на стационарные (с постоянным периодом) и нестационарные (с изменяющимся периодом). Нестационарные КПП могут иметь

разнообразную форму и различные особенности: тренды, изменение периода и модуляцию частоты или амплитуд. Кроме того, они могут проявляться в виде волновых пакетов или иметь треугольную форму. Иногда в одном и том же временном профиле вспышки можно одновременно наблюдать различные проявления нестационарности [Kolotkov et al. 2018].

В свою очередь, нестационарные вспышки делятся на мультипериодические, в которых нестационарность является результатом взаимодействия нескольких периодических компонент (мод) [Inglis and Nakariakov, 2009], что может быть следствием суперпозиции нескольких мод от разных источников [Kolotkov et al., 2015]. И на те, в которых нестационарность является проявлением изменения физических параметров плазмы во вспышечной области [Dubinov and Kolotkov, 2018], что можно использовать для диагностики плазмы [Inglis et al., 2009; Guo et al., 2016]. Период КПП может быть как постоянным, так и иметь собственный дрейф, что отмечено в работе [Kurpiyanova et al., 2010]. Дрейф периода также был отмечен в микроволновом и рентгеновском излучении в работе [Reznikova, Shibasaki, 2011], КУФ-диапазоне [Hayes et al., 2016], в том числе и мощных вспышках в сентябре 2017 г. [Kolotkov et al., 2018; Hayes et al., 2019].

Относительно возможных причин возникновения КПП в солнечных вспышках высказываются различные предположения, но этот вопрос сложно решить из-за разнообразия проявления КПП в различных диапазонах. В качестве причин КПП обычно рассматриваются следующие механизмы: 1) моды МГД-колебаний петель (сосисочная, изгибная, торсионная, медленная и быстрая магнитозвуковая моды) [Nakariakov et al., 2012]; 2) колебания RLC-контура [Зайцев и Степанов, 2008]; 3) периодически индуцированное магнитное пересоединение [Nakariakov, Zimovets, 2011]; 4) автоколебания корональной петли [Murray et al., 2009; Nakariakov et al., 2010]; 5) хлопающие колебания [Erkaev et al., 2007]; 6) тепловая неустойчивость [Tan et al., 2016]; 7) периодическое взаимодействие двух корональных петель [Tajima et al., 1987; Kolotkov et al., 2016]; 8) модель магнитного камертона [Takasao and Shibata, 2016]. Можно выделить два класса механизмов

излучения – КПП являются результатом модулирования излучения вспышечной плазмы волновыми процессами и непосредственная генерация КПП в результате каких-либо процессов (например, пересоединения токовых слоев).

Анализ КПП обычно проводят с использованием методов, основанных на преобразовании Фурье (см, например, [Reznikova et al., 2005]), который, однако, требует строгой периодичности (стационарности) колебаний. В действительности же большинство КПП имеют различные особенности формы сигнала (признаки нестационарности процесса), что затрудняет их изучение. Для таких КПП применяются другие методы, например, вейвлет-анализ [Mathioudakis et al. 2003; Kupriyanova et al. 2010; Torrence and Compo, 1998], преобразованиях Гильберта [Huang et al., 1998] и Вигнера — Вилля [Kislyakov et al., 2006]. Все перечисленные методы обладают недостатком, в случае изучения нестационарных КПП заключающимся в наличии периодических базовых функций, по которым происходит разложение сигнала. Поэтому для изучения нестационарных КПП обычно применяется EMD-метод (Empirical Mode Decomposition), который не предполагает никаких базовых функций [Huang and Wu, 2008].

КПП могут наблюдаться одновременно в нескольких диапазонах, например, рентгеновском и микроволновом (например, [Asai et al., 2001]). Поскольку в процесс вспышки вовлечены различные слои солнечной атмосферы, то сравнительный анализ излучения в различных диапазонах дает уникальный материал, позволяющий определить места высвобождения и переноса энергии.

Параметры КПП в различных диапазонах электромагнитного спектра очень чувствительны к изменениям параметров излучающей плазмы (температуре и плотности), ускоренным частицам и магнитному полю. Таким образом, КПП является превосходным инструментом для диагностики как физических параметров во вспышечных областях, так и механизмов излучения. Особый интерес представляют нестационарные КПП, упомянутые выше. Однако существуют некоторые трудности для 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.

### **3.2 Отбор событий для исследования**

Для отбора событий, подходящих для проведения исследования КПП солнечных вспышек в нескольких диапазонах, необходимо было наличие одновременных многоволновых наблюдений, полученных на различных инструментах, и первичная информация о наличии КПП хотя бы в одном из спектральных диапазонов.

В качестве такой первичной информации был выбран список вспышек с выявленными устойчивыми периодами КПП, внесенный в The Automated Flare Inference of Oscillations catalogue (каталог AFINO), разработанный для автоматического поиска признаков КПП в данных GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) [Inglis et al., 2015; 2016]. Данный каталог содержит данные обо всех вспышках, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне, начиная с 2011 года. Для анализа данных используется спектральная плотность функции Фурье для определения постоянного периода КПП во временных профилях солнечных вспышек. В случае выявления колебаний с постоянным периодом, она отмечается в каталоге как представляющая интерес. Из этого каталога было выделено 14 вспышек, для которых не был найден постоянный период (а, значит, они потенциально имели нестационарные КПП) и которые наблюдались на СРГ-48. Из них в двух событиях нестационарность КПП являлась результатом сложения нескольких периодических компонент, а вспышка 5 сентября 2017 года в 07:04 UT показала признаки истинной нестационарности. Вспышка соответствовала также критериям отбора для инструментов – она наблюдалась в нескольких диапазонах одновременно.

Данное событие произошло в АО NOAA 12673, описанной в Главе 2, и имело рентгеновский класс С6.9. Вспышка началась 05 сентября 2017 года примерно в 07:04 UT (Рисунок 19).

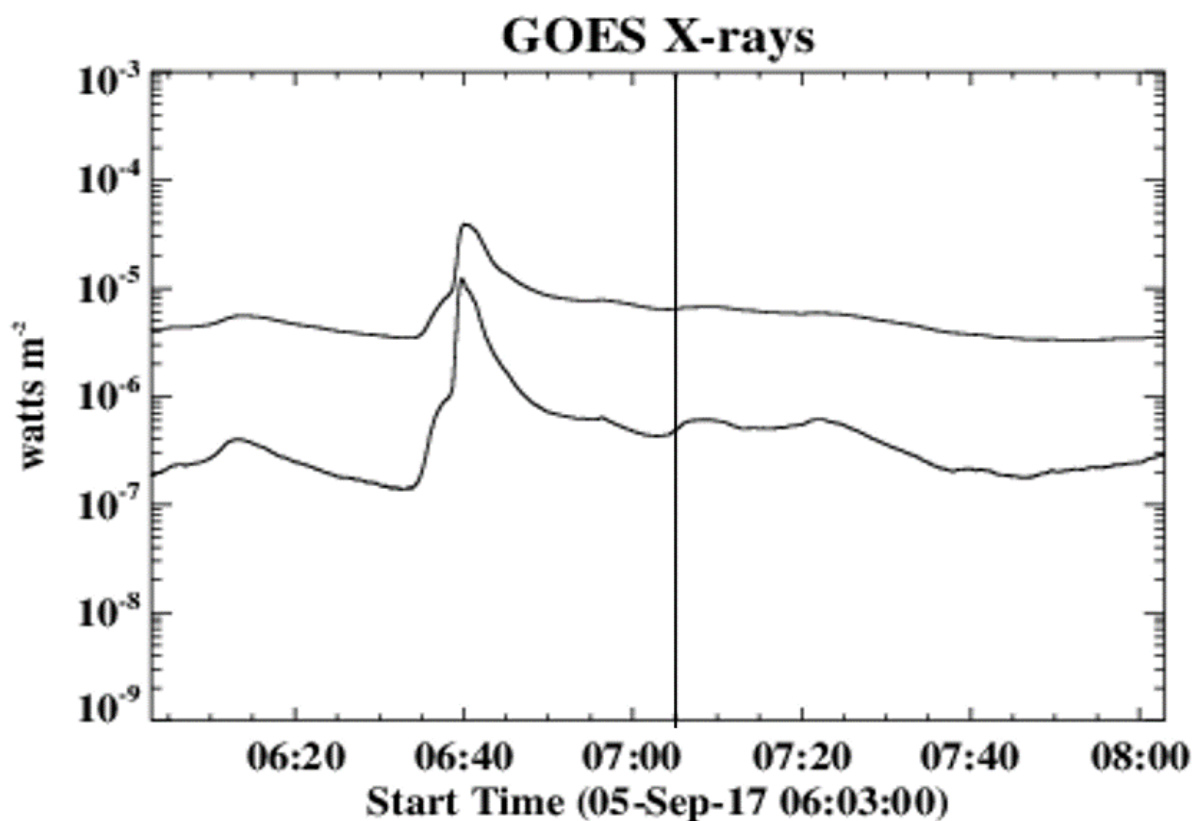


Рисунок 19. Временной профиль рентгеновского излучения по данным GOES. Вертикальной линией отмечено исследуемое вспыхивающее событие класса C6.9.

### 3.3 Данные и инструменты

Вспышка C6.9 одновременно наблюдалась в нескольких диапазонах различными инструментами. Дополнительная уникальность этого события заключалась в том, что были доступны двумерные многоволновые данные SPG-48 в микроволновом диапазоне и данные нового инструмента MUSER в дециметровом диапазоне.

Мингантунский спектральный радиогелиограф (MingantU SpEctral Radioheliograph – MUSER) наблюдает Солнце в диапазоне частот 0.4 –15 ГГц и состоит из двух решеток: высокочастотной MUSERI и низкочастотной MUSERII [Yan, 2021]. При анализе вспышки были использованы данные только первой решетки, получающей данные в диапазоне 0.4–2 ГГц с временным разрешением 25 мс.



В микроволновом диапазоне вспышку наблюдал СРГ–48, описанный подробно во второй главе, и Широкополосный микроволновый спектрополяриметр (BBMS). Его диапазон наблюдений составляет 3.8–8.2 ГГц, спектральное разрешение 16 частот и временное разрешение 0.6 с [Zhdanov, Zandanov, 2011]. Также использовались данные станции Learmonth, входящей в сеть Radio Solar Telescope Network (RSTN), получающих данные в диапазоне от 245 МГц до 15.4 ГГц с временным интервалом 1 секунда [Giersch, 2022].

Мини-спутник PROBA2 был запущен в 2007 году и укомплектован двумя инструментами для солнечных наблюдений Sun Watcher with Active Pixel System detector and Image Processing (SWAP) [Seaton et al., 2013; Halain et al., 2013], наблюдающем солнечную корону в КУФ диапазоне и фотометр LYRA. SWAP получает изображения солнечной короны до расстояния 2.36 солнечных радиусов на длине волны 174 Å с пространственным разрешением 3.16" и с временным разрешением 1-2 минуты.

### **3.4 Анализ события**

На Рисунке 20 представлены временные профили вспышки по данным различных инструментов: GOES, СРГ-48, BBMS, MUSER, RSTN.

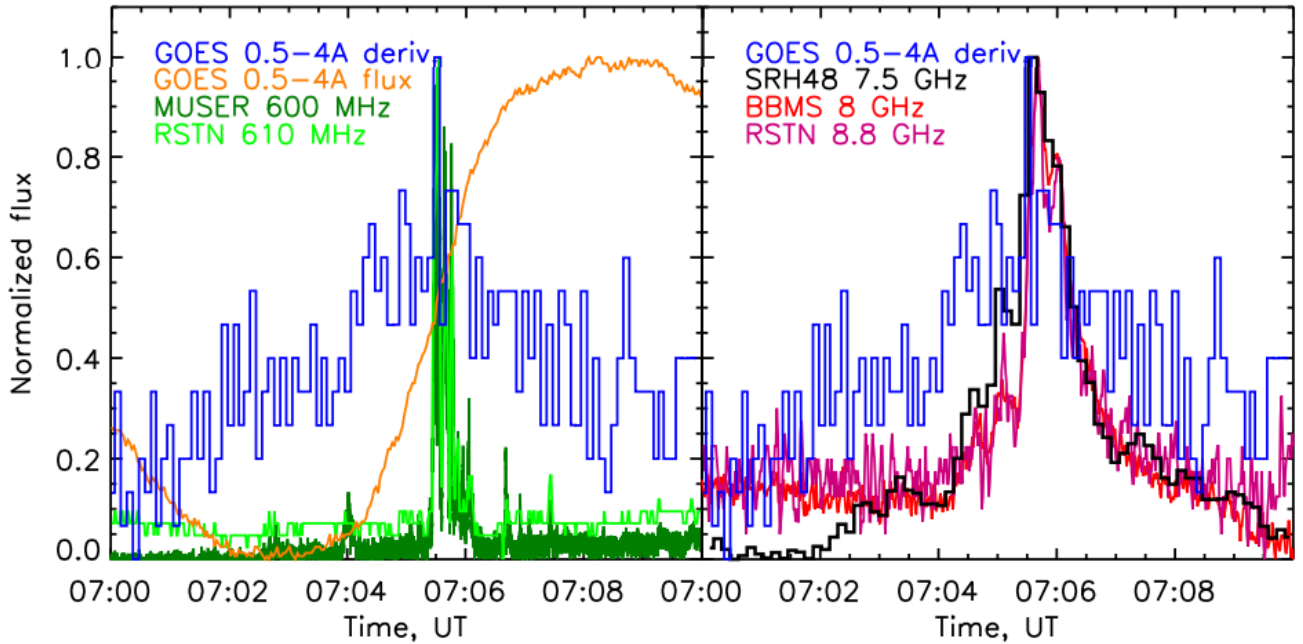


Рисунок 20. Временные профили вспышки S6.9 на данных различных инструментов.

Для определения присутствия ускоренных электронов в анализируемой вспышке был произведен анализ с использованием производной временного профиля мягкого рентгена в диапазоне 0.5 - 4 Å. (эффект Ньюперта [Neupert, 1968]). Эффект Ньюперта основан на том, что нагрев вспышечной плазмы, излучающей в мягком рентгеновском диапазоне, происходит вследствие потери энергии ускоренными электронами. Поэтому производная временного профиля мягкого рентгеновского излучения может использоваться как индикатор высыпания ускоренных нетепловых электронов. В данном случае наблюдается хорошая согласованность между временными профилями излучения в микроволновом и дециметровом диапазонах с производной временного профиля излучения мягкого рентгена. Это свидетельствует как о том, что во время вспышки присутствовали ускоренные электроны, так и о том, что их энергия перешла в тепловое излучение.

Кроме того, видно, что радиовсплеск на 600 МГц более быстрый и совпадает с максимумом производной от временного профиля излучения мягкого рентгена. Эти два факта свидетельствуют о существовании теплового излучения ускоренных электронов в общем потоке радиоизлучения от вспышки. Отсутствие магнитной

ловушки в конфигурации магнитных полей в АО видно из сравнения затухающей фазы вспышки на временных профилях микроволнового излучения и производной мягкого рентгена. В случае наличия магнитной ловушки микроволновый спектр излучения спадает медленнее рентгеновского. В исследуемом событии такого не наблюдается, что означает практическое одновременное высыпание электронов в верхние и нижние слои атмосферы.

Поскольку наблюдаемые колебания могут иметь не солнечную, а, например, инструментальную природу, необходимо было использовать независимые данные для подтверждения того, что это не артефакт. Для этого были выбраны данные с инструмента VBMS и станций Learmonth RSTN с временным разрешением 0.6 и 1 секунда соответственно. Совпадение формы временных профилей и их особенностей, полученных из независимых друг от друга данных, доказывает, что наблюдаемые колебания имеют солнечную природу, а не появились в результате инструментальных или ионосферных эффектов.

### **3.5 Анализ наблюдений**

Для построения радиоспектров в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц были выбраны два момента времени: время, в которое наблюдался максимум на 600 МГц на временном профиле RSTN (на Рисунке 21 обозначен синим цветом), и время, в которое наблюдался максимум микроволнового излучения (обозначен красным цветом).

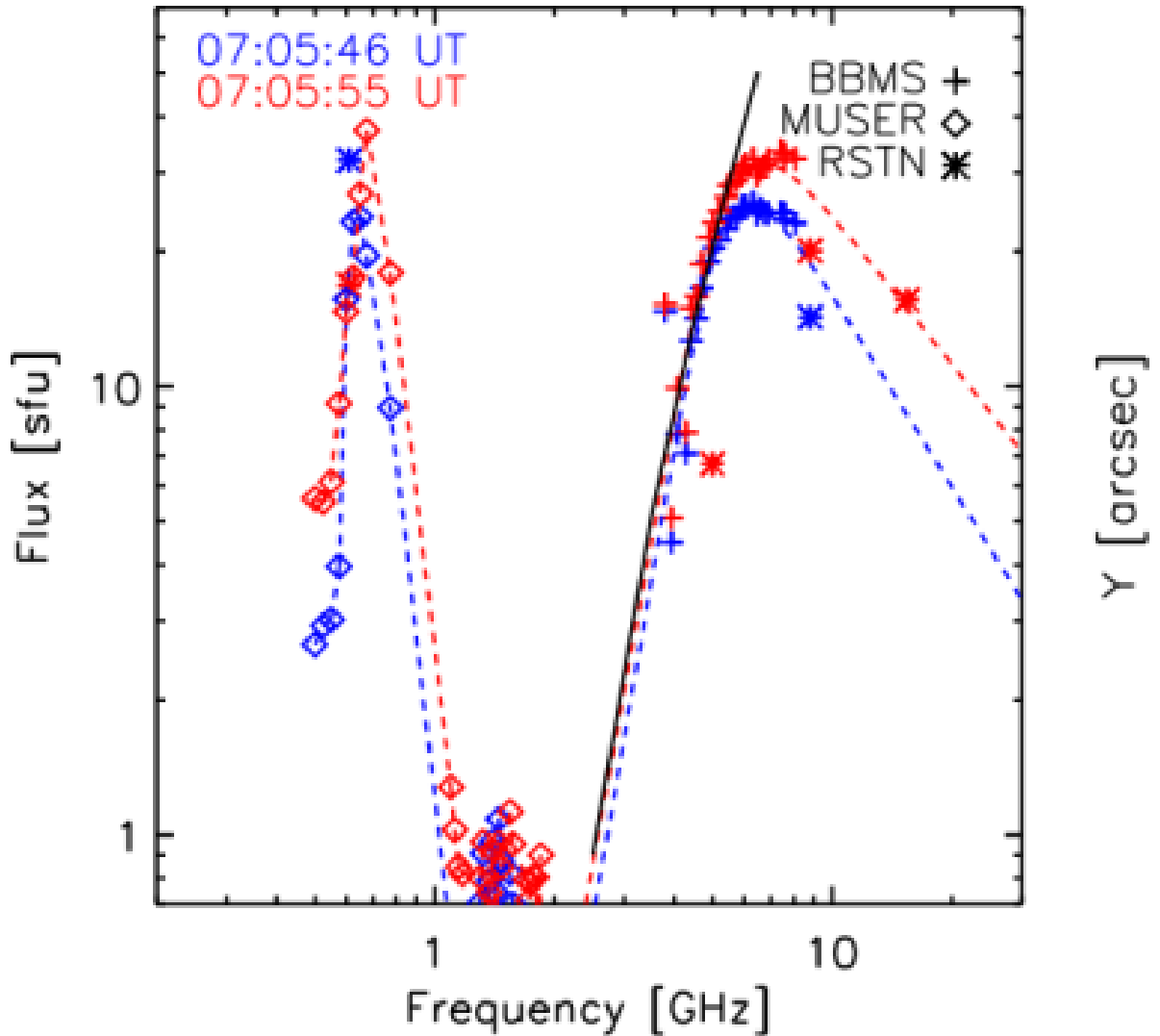


Рисунок 21. Радиоспектры по данным MUSER, RSTN и BBMS. Красным цветом обозначен спектр потока в 07:05:46 UT, синим – в 07:05:55 UT, черным – аппроксимирующая функция с показателем степени  $\sim 1.8$ .

На Рисунке 21 показан радиоспектр, построенный по данным MUSER, RSTN и BBMS, для двух моментов времени, соответствующих максимумам излучения в дециметровом (красный график, 07:05:46 UT) и микроволновом (синий график, 07:05:55 UT) диапазонах. Излучение в дециметровом диапазоне достигает максимума на 600 МГц наступает немного раньше, чем для микроволнового излучения. Когда в микроволновом диапазоне наблюдается фаза роста, то в дециметровом уже достигнут пик. Полученный спектр можно разделить на две части: плазменную (до 2 ГГц) и микроволновую (некогерентную). Спектр

когерентного плазменного излучения вблизи 600 МГц имеет характерную для этого вида излучения очень узкую вытянутую форму. Микроволновый спектр для обоих моментов времени имеет форму, соответствующую гиросинхротронному механизму излучения. В работе [Nita et al., 2004] предложена формула, позволяющая определить частоту спектрального максимума и асимптотическую функцию для участков спектров, подобных гиросинхротронному, выше и ниже спектрального максимума. Используя формулу (1) из работы [Nita et al., 2004], была получена частота спектрального максимума для микроволнового излучения, равная примерно 6.6 ГГц для обоих моментов времени. Она разделяет микроволновый спектр на излучение от оптически тонкого (высокочастотная часть спектра) и оптически толстого источника (низкочастотная часть). Таким образом, излучение в микроволновом диапазоне на частотах 6.8 и 7.5 ГГц соответствуют оптически тонкой области спектра и показывают участки вспышечной петли вблизи основания, тогда как излучение на частотах 4.5 и 5.2 ГГц соотносятся с оптически толстым излучением из вершины петли. Фотонный спектральный индекс, рассчитанный по той же методике [Nita et al., 2004], составляет для высокочастотной части 2.9 и 2.5 для первого и второго момента времени соответственно. Для низкочастотной части в микроволновом диапазоне он составляет около 2.5, показывая отсутствие эффекта Разина [Razin, 1960] и нормальную плотность излучающей вспышечной петли.

Для данных MUSER был построен динамический спектр излучения в интенсивности и поляризации (Рисунок 22).

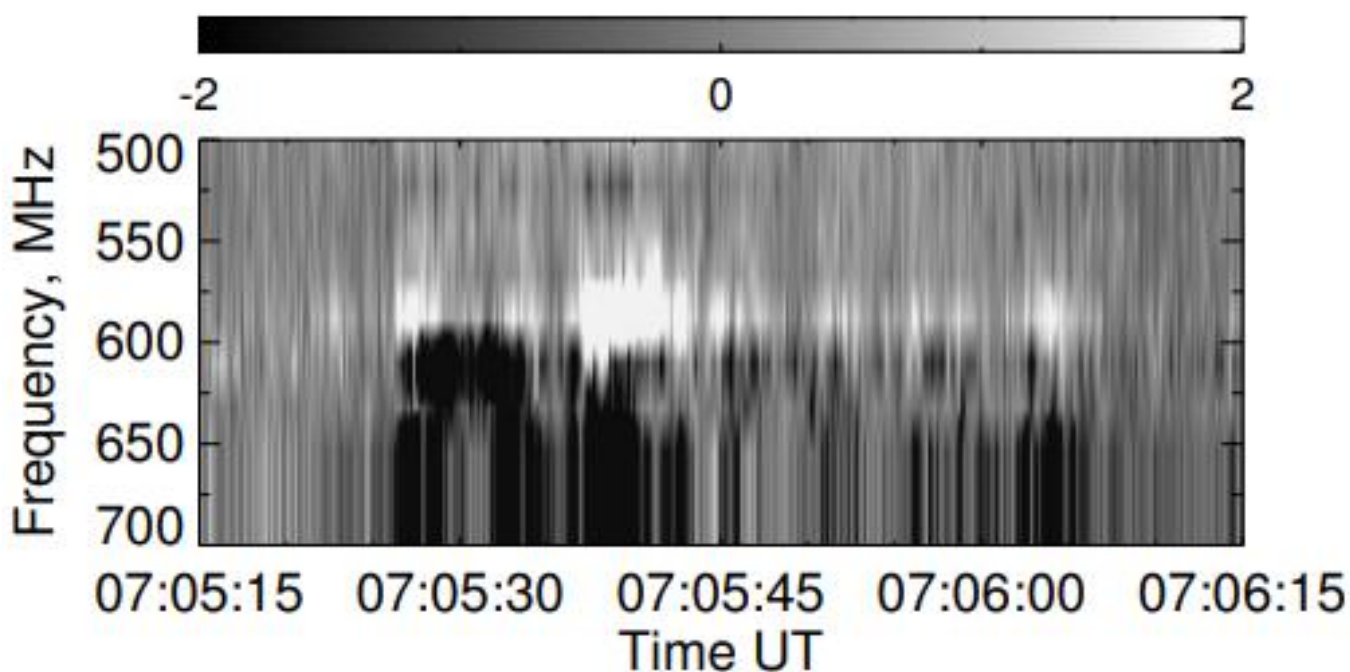
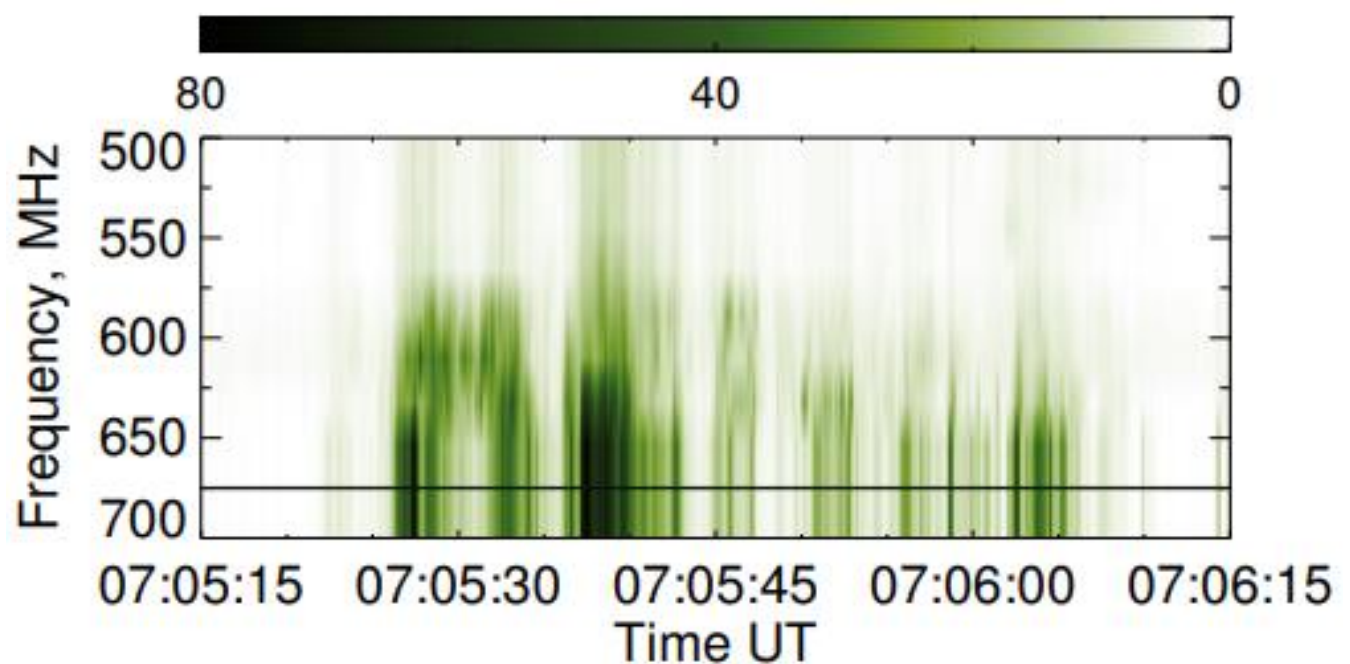


Рисунок 22. Динамический спектр MUSER для интенсивности R+L (верхняя панель) и поляризации R-L (нижняя панель). Горизонтальная линия на верхней панели показывает частоту, на которой спектр достигает максимума.

Динамический спектр на Рисунке 22 показывает серию квазипериодических узкополосных всплесков, схожих с радиовсплесками I типа. Классические шумовые бури I типа обычно наблюдаются ниже 400-450 МГц и ассоциируются с

источниками на высотах около 0.2 солнечных радиусов [Mercier et al., 2015]. Считается, что наблюдаемые дециметровые всплески также генерируются нетепловым излучением электронов. На нетепловой механизм излучения указывает, в том числе, наличие значительной поляризации наблюдаемых дециметровых всплесков (нижняя панель на Рисунке 22). Хотя большая часть излучения имеет положительный знак поляризации, наблюдаются участки инверсии вблизи 600 МГц. В случае наличия ускоренных электронов подобная смена знака может означать смену направления движения частиц, что возможно только вблизи вершины петли. Таким образом, можно сделать вывод о наличии источника дециметровых всплесков, расположенного достаточно высоко.

На Рисунке 23 представлено изображение в КУФ-диапазоне, полученное PROBA2/SWAP на длине волны 174 Å, сопоставленное с контурами источников излучения в микроволновом диапазоне по данным SRG-48 на частотах 4.5 и 7.5 ГГц.

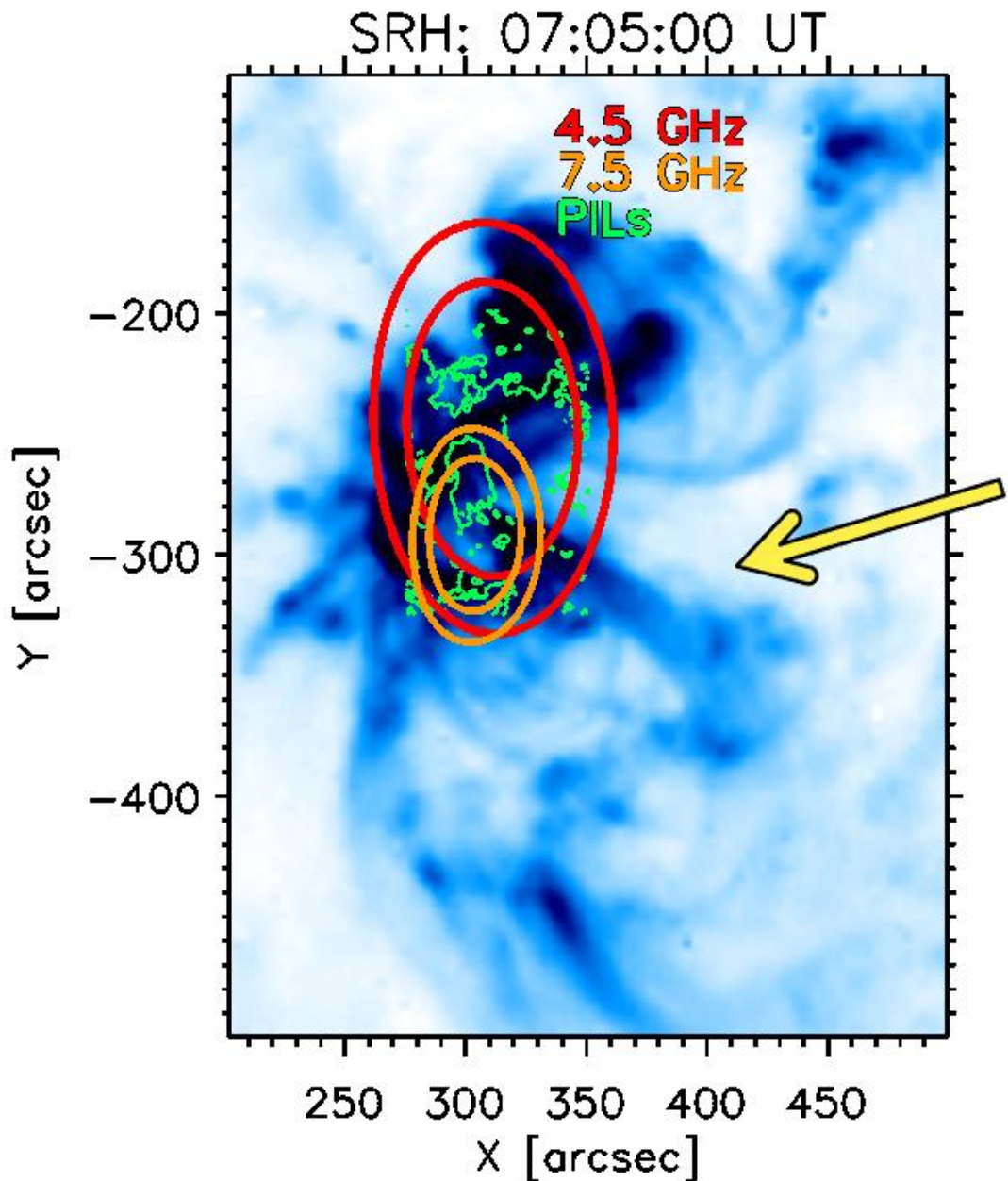


Рисунок 23. Изображение PROBA2/SWAP  $174 \text{ \AA}$ , контурами обозначены микроволновые источники на 4.5 и 7.5 ГГц; стрелкой показана высокая петельная структура. Зеленым обозначены линии инверсии полярности фотосферного магнитного поля. Стрелкой показана высокая петельная структура, расположенная вблизи основания вспыхивающих петель.

АО 12673 имела хорошо развитую магнитную структуру с сильными магнитными полями. Следовательно, в АО существовали мощные квазистационарные источники радиоизлучения: пятенный источник и ИНЛ. Среди множества сильных вспышек, произошедших в данной АО, нестационарные КПП



проявляются в достаточно слабой вспышке класса С. Поэтому, для исключения вклада постоянного излучения от солнечного пятна и ИНЛ была применена техника вычитания изображений, полученных в микроволновом диапазоне до вспышки, из изображений во время нее. Это позволило более четко локализовать появившиеся области излучения во время вспышки на разных частотах и сопоставить их со структурами, наблюдаемыми в КУФ (отмечены контурами на Рисунке 23). Согласно спектральному анализу, источники на 6.8 и 7.5 ГГц показывают наличие компактных источников излучения, расположенных вблизи основания вспышечной петли, в то время как источники на 4.5 и 5.2 ГГц показывают излучение из верхних областей петельной структуры.

Считая геометрию петли за полукруг, можно рассматривать расстояние между центрами излучения на 4.5 и 7.5 ГГц, составляющее  $\sim 43''$ , как высоту петли. Это значение согласуется со средним размером петель, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне. Кроме того, результаты предыдущих работ, посвященные изучению положения пульсаций в дециметровом диапазоне относительно положения источников в рентгеновском диапазоне, указывают на то, что пространственно эти источники могут располагаться на значительном расстоянии по высоте друг от друга. При этом временной профиль дециметрового излучения может не коррелировать с временным профилем рентгеновского излучения. Эти факты указывают на то, что вспышечное излучение генерируется не захваченными во вспышечную петлю электронами, а приходит из токового слоя, расположенного гораздо выше вершины вспышечной петли [Battaglia and Benz, 2009; Benz, et al., 2011].

При анализе изображения АО в КУФ-диапазоне была обнаружена высокая структура вблизи источников излучения на 7.5 ГГц (отмечена стрелкой на Рисунке 23). Дополнительный анализ изображений в КУФ-диапазоне показал, что данная структура являлась долгоживущей и наблюдалась в течение нескольких дней на изображениях SDO/AIA 171 Å, как до изучаемой вспышки, так и после нее. Эта структура не была задействована во вспышечном процессе, иначе исчезла бы после

исследуемой вспышки. Конфигурация магнитных полей в АО 12673 была очень сложной, с вкраплениями противоположных полярностей. Наличие многочисленных линий инверсии магнитного поля предполагает наличие токовых слоев в структуре АО. Так как высокая структура находится вблизи линий инверсии магнитного поля (Рисунок 23), она является кандидатом на структуру с токовыми слоями.

### 3.6 Анализ периодичности вспыхивающего излучения в разных диапазонах

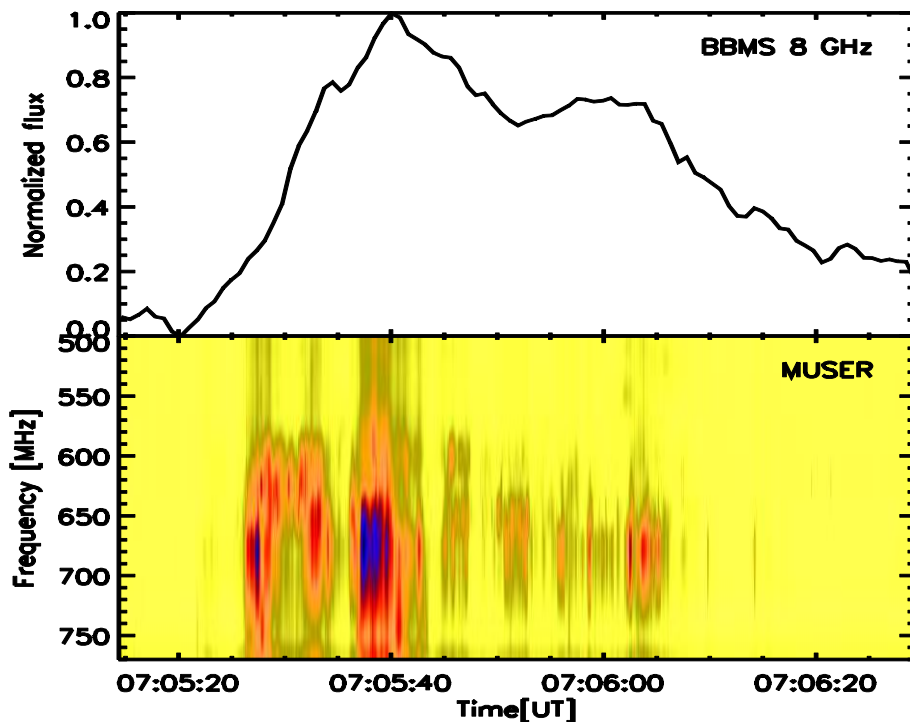


Рисунок 24. Верхняя панель: временной профиль излучения в микроволновом диапазоне на частоте 8 ГГц по данным BBMS. Нижняя панель: динамический спектр излучения в дециметровом диапазоне, полученный MUSER

На Рисунке 24 показано совмещение графиков излучения в микроволновом (верхняя панель), и дециметровом (нижняя панель) диапазоне. В обоих случаях наблюдаются квазипериодические осцилляции в излучении, но с разными

периодами. Такой же результат получен в результате проведения детрендинга (удаления низкочастотной компоненты сигнала), что показано на Рисунке 25 (рисунок 5 из [Kasharova et al., 2021]).

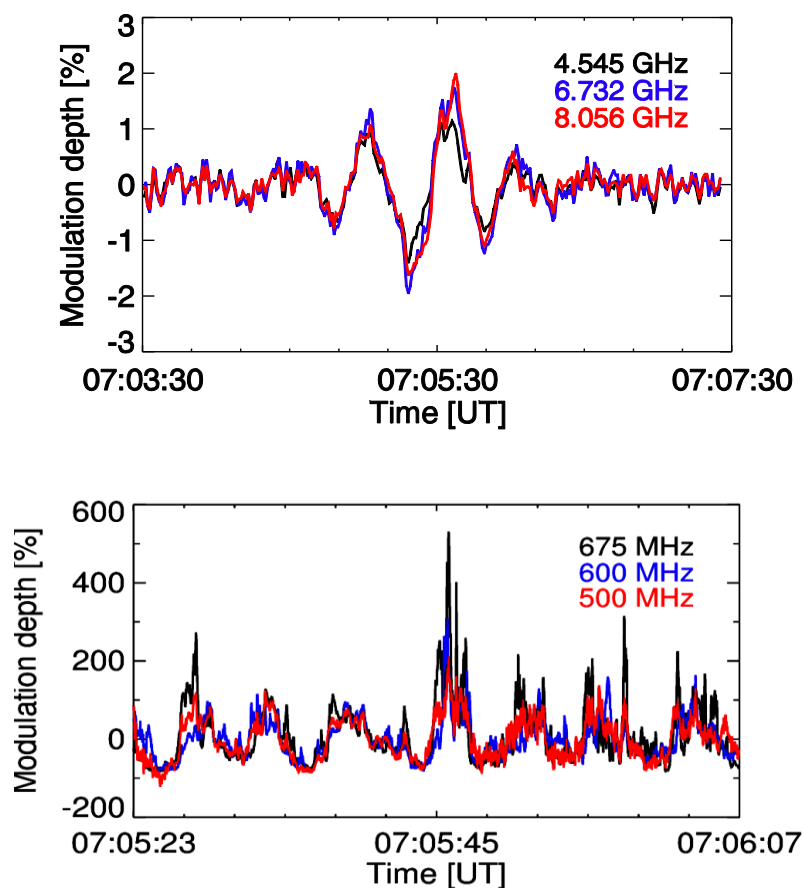


Рисунок 25. Временные профили излучения после детрендинга в микроволновом (верхняя панель) и дециметровом (нижняя панель) диапазонах.

В работе [Kasharova et al., 2021] была исследована периодичность и добротность наблюдаемых в данном событии КПП. Выполненный анализ показал, что период микроволнового излучения составил около 20-30 секунд на восходящей фазе вспышки с 07:04:10 до 07:06:30. Приведенный на Рисунке 22 динамический спектр в дециметровом диапазоне также имеет квазипериодичность, хорошо различимую в интенсивности с 07:05:22 по 07:06:05, в том числе с более коротким периодом вблизи максимума в 07:05:40. Рассчитанный для данных ВВМС на частоте 8.056 ГГц при помощи вейвлет-анализа период составил около  $30 \pm 10$  с., а

определенный для тех же данных по периодограмме Фурье дал схожее значение в  $30 \pm 5$  с. Эти КПП со схожим периодом около 30 секунд были зафиксированы на всех частотах СРГ-48 в диапазоне 4-8 ГГц. Кроме того, все обнаруженные колебания были софазны на всех временных профилях [Kasharova et al., 2021].

Анализ временных профилей, полученных MUSER в диапазоне 500-700 МГц, показал наличие семи полных циклов КПП с более коротким периодом  $6 \pm 1.5$  с. Эти колебания происходили в фазе на всех частотах внутри этого диапазона (софазны). В результате анализа события были получены следующие параметры осцилляций, происходивших одновременно в микроволновом и дециметровом диапазонах:

В микроволновом диапазоне:

1. Обнаружено три явных цикла колебаний с периодом около 30 с.
2. Не обнаружено изменения пиковой частоты и фотонного спектрального индекса
3. Отсутствует эффект Разина на низких частотах
4. Временные профили колебаний софазны для оптически тонкого и оптически толстого излучения
5. Глубина модуляции одинакова на всех частотах и ее значение составляет несколько процентов

Для дециметрового излучения:

1. Выявлено семь циклов колебаний с периодом около 6 секунд
2. Максимум частоты находится вблизи 675 МГц и не меняется в течение события
3. КПП проявляются только в полосе частот 500-700 МГц
4. Знак параметра Стокса  $V_{ne}$  изменяется со временем, но зависит от частоты- знак поляризации обращается на низких частотах.
5. Временные профили осцилляций также демонстрируют софазное поведение.
6. Глубина модуляции составляет около 100 %

На основании изложенных выше параметров был предложен сценарий, объясняющий возникновение КПП, генерируемых одним источником одновременно в дециметровом и микроволновом диапазоне.

На Рисунке 26 представлена схема, объясняющая данный сценарий.

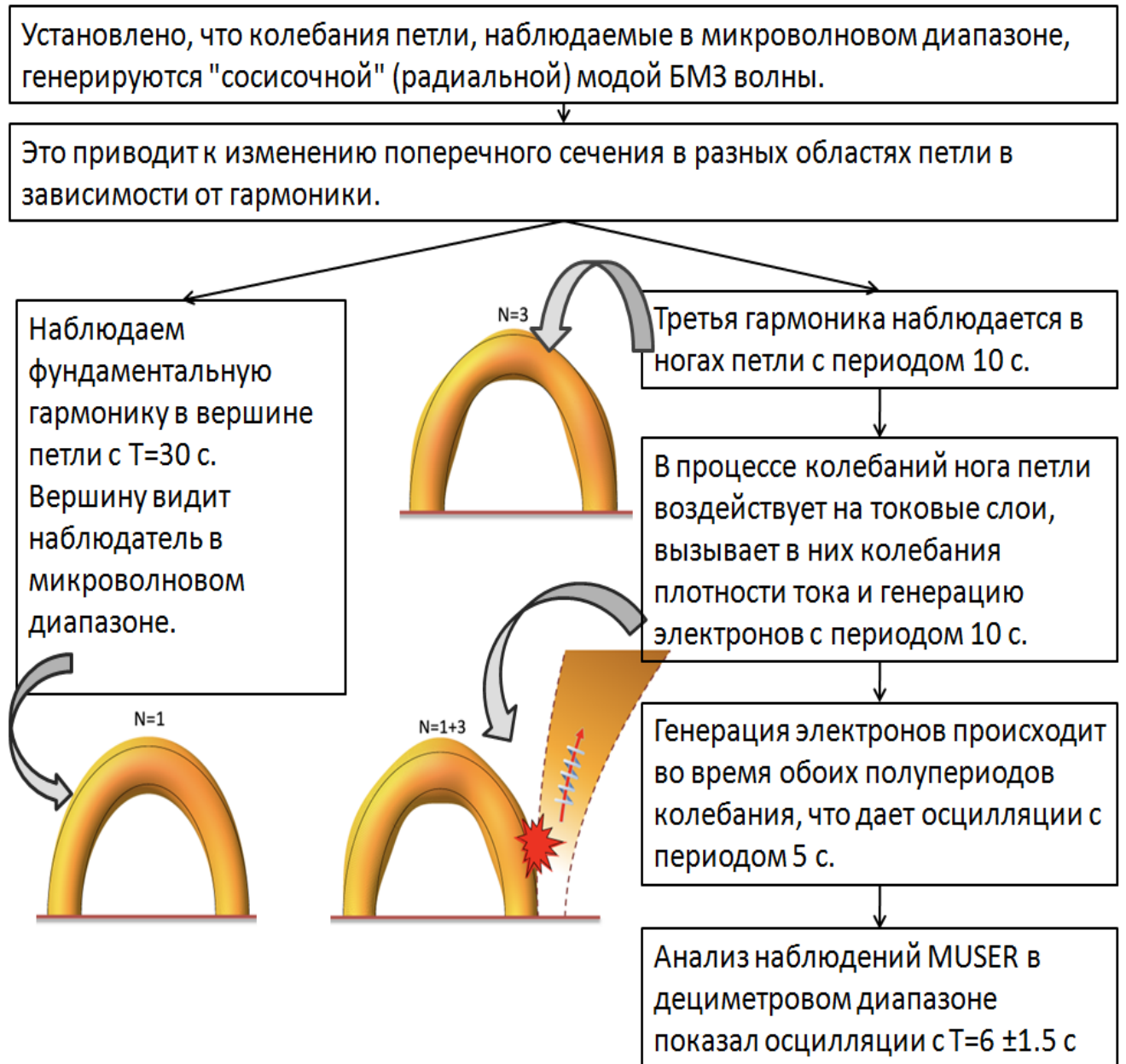


Рисунок 26. Сценарий генерации одновременных колебаний в двух диапазонах.

Одним из предполагаемых сценариев возникновения осцилляций является возбуждение в петле гиротронного излучения сосисочной модой быстрой магнитоакустической волны, что показано в работах [Melnikov et al., 2005; Inglis, et

al., 2008; Kuznetsov et al., 2015]. Как видно на рисунке 22, изменения величины потока микроволнового излучения происходит за счет увеличения или уменьшения потока в области пиковой частоты. При этом не меняется спектральный индекс высокочастотной части спектра и положение пиковой частоты. Подобные изменения можно объяснить увеличением или уменьшением площади источника, что является одним из свойств сосисочной моды.

Как известно, сосисочная мода приводит к изменениям поперечного сечения петли в различных ее частях в зависимости от гармоник. Поскольку импульсное энерговыделение может возбуждать в одной петле различные гармоники сосисочной моды, рассмотрим их по отдельности. Первая и наиболее сильная гармоника сосисочной моды изменяет сечение вспышечной петли вблизи вершины петли. Эта область больше всего соотносится с микроволновым излучением оптически толстого источника и близких к нему частот. Найденная частота спектрального максимума равна примерно 6.6 ГГц. Таким образом, основная сосисочная гармоника с  $T = 30$  с должна проявляться в микроволновом диапазоне, что и наблюдалось в исследуемой вспышке.

Второй рассматриваемый случай касается возбуждения третьей гармоники сосисочной моды, максимальное проявление которой будет наблюдаться в ногах вспышечной петли. Если первая гармоника имеет период  $T = 30$  с, то третья гармоника должна иметь  $T = 10$  с. Осцилляции, вызванные третьей гармоникой в основаниях вспышечной петли, могут воздействовать на расположенную рядом высокую петельную структуру, что будет вызывать в токовых слоях колебания плотности тока и генерировать электроны с тем же периодом 10 с

Как видно из совмещения изображения в ультрафиолете с микроволновыми данными, излучение на 6.8 и 7.5 ГГц исходит из областей вблизи одного из оснований вспышечной петли, расположена вблизи высокой структуры, которая является кандидатом на систему токовых слоев. В случае воздействия на эту системы токовых слоев генерация электронов будет происходить во время обоих полупериодов колебаний, что в свою очередь приводит к колебаниям высокой

петельной структуры с периодом около 5 с. В работе [Nakariakov et al., 2006] представлено моделирование такого взаимодействия. Согласно проведенному в статье [Kasharova et al., 2021] анализу, в дециметровом диапазоне наблюдались КПП с периодом  $6 \pm 1.5$  с, что согласуется с расчетным. Тот наблюдательный факт, что в микроволновых данных не было обнаружено третьей гармоники, может быть связан с ее малой амплитудой.

### **Выводы Главы 3**

Проведенный многоволновой анализ позволил выявить одновременные квазипериодические пульсации в дециметровом и микроволновом излучении во время вспышки 5 сентября 2017 года в 07:04 UT.

Во временных профилях микроволнового излучения было выявлено 3 цикла софазных колебаний с периодом около 30 секунд в основаниях и вершине петли. В дециметровом диапазоне было выявлено как минимум семь циклов софазных колебаний с периодом около 6 секунд, с максимумом излучения на 675 МГц.

Совместный анализ радиоданных в микроволновом и КУФ диапазоне продемонстрировал, что основание петельной структуры АО находится вблизи веерной структуры. Проведенный анализ топологии микроволновых вспышечных источников с использованием изображений, полученных в диапазоне 4-8 ГГц на SRG-48, показал их связь с высокой петельной структурой.

Предложено объяснение взаимодействия между источником всплесков в дециметровом диапазоне и всплесками в микроволновом диапазоне.



## Заключение

В диссертационной работе представлены результаты анализа нестационарных явлений, наблюдающихся в короне Солнца. Часть работы выполнена с привлечением оригинальных данных новых инструментов SRG и MUSER.

Получены следующие результаты, расширяющие знания о процессах энерговыделения в солнечной короне:

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 годах, 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 СРГ–48, показал их связь с высокой петельной структурой. Предложен сценарий, объясняющий взаимодействие между источником всплесков в дециметровом диапазоне и всплесками в микроволновом диапазоне.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Дмитрию Владимировичу Просовецкому за постановку интересных научных задач и возможность выбора направления исследований. Автор сердечно благодарит Ларису Камалетдиновну Кашапову за поддержку и всестороннюю помощь в подготовке работы, Виктора Васильевича Гречнева за наставления в методах обработки данных, Аркадия Михайловича Уралова за полезные дискуссии. Автор выражает признательность коллегам за поддержку на пути научных исследований. Автор выражает благодарность Отделу Радиофизики ИСЗФ СО РАН за возможность работать с данными уникального инструмента Сибирского Радиогелиографа и Широкополосного спектрополяриметра. Автор выражает признательность коллективам сотрудников радио и космических солнечных обсерваторий Nobeyama, SDO, SOHO, STEREO и MUSER за возможность использовать данные наблюдений. Автор благодарен семье и друзьям за поддержку и понимание.

## Список основных сокращений

АО – активная область

КА – космический аппарат

КВМ – корональный выброс массы

КД – корональная дыра

КПП – квазипериодические пульсации

КУФ – крайний ультрафиолетовый диапазон

ПКД – полярная корональная дыра

СА – солнечная активность

СВ – солнечный ветер

ИНЛ – источник над нейтральной линией (NLS – Neutral Line associated Source)

## 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. Боровик В.Н. Признаки подготовки мощных вспышек на Солнце в сентябре 2017 г. в микроволновом излучении и структуре магнитного поля активной области по данным РАТАН-600 и SDO/HMI / В.Н. Боровик, В.Е. Абрамов-Максимов, А.Г. Тлатов, Л.В. Опейкина, [и др.] // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. – 2018. – V. 114. – № 1. – Р. 89–94
3. Зайцев В.В. Корональные магнитные арки / В.В. Зайцев, А.В. Степанов // Успехи физических наук. – 2008. – № 178. – С. 1165–1204
4. Ишков В.И. Всплывающие магнитные потоки – ключ к прогнозу больших солнечных вспышек / В.И. Ишков // Изв. РАН. – 1998. – Т. 62. – № 9. – С. 1835–1839
5. 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
6. Лесовой С.В. Сибирский радиогелиограф: первые результаты / Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А., Гречнев В.В. [и др.] // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3. – №1. – С. 3–16.
7. Лесовой С.В. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа / Лесовой С.В., Кобец В.С. // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3. – №1. – С. 17-21
8. Максимов В.П. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек / Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. //

- Бюллетень изобретений. – 1996. – № 21б. – Патент № 2114449 от 27.06.1998 г. С. 131–134
9. Разин В.А. Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1960. – Т. 3. – Вып. 4. – С. 584
10. 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.
11. Уралов А.М. Микроволновые источники над нейтральной линией: рождение, связь со вспышками и проекционный эффект / Уралов А.М., Руденко Г.В., Руденко И.Г. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2006. – Т. 70. – № 10. – С. 1475–1477
12. 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 // Sol. Phys.– 2015.– V. 290. – №. 1. – P. 53–77
13. Anfinogentov S.A. Record-breaking coronal magnetic field in solar active region 12673. / Anfinogentov S.A., Stupishin A.G., Mysh'yakov I.I., Fleishman G.D. // Astrophys. J. Lett. – 2019. – V. 880. – Iss. 2. – L29. – P. 5
14. Asai A. Periodic acceleration of electrons in the 1998 november 10 solar flare / Asai A., Shimojo M., Isobe H., Morimoto T. [et al.] // ApJ. – 2001. – V. 562. – L103
15. Barlyaeva T. Periodic behaviour of coronal mass ejections, eruptive events, and solar activity proxies during solar cycles 23 and 24. / Barlyaeva T., Wojak J., Lamy P., Boclet, B., [et al.] // Jastp. – 2018. – V. 177. – P. 12-28
16. Battaglia M. Do solar decimetric spikes originate in coronal X-ray sources? / Battaglia M., Benz A.O // Astron. Astrophys. – 2009. – V. 499. – L33.
17. Benz A.O., Location of decimetric pulsations in solar flares. / Benz A.O., Battaglia M., Vilmer, N. // Sol. Phys. – 2011. – V. 273. – P. 363.

18. Bogod V.M. Peculiarities of the microwave emission from active regions generating intense solar flares Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh. // *Astron. Lett.* – 2003. – V. 29. – P. 263–273
19. Borovik V. N. Local maximum in the microwave spectrum of solar active regions as a factor in predicting powerful flares / Borovik V. N., Grigor'eva I. Yu., Korzhavin A. N // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2012. – V. 52. – Iss. 8. – P.1032-1043
20. Brueckner G.E. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). / G.E. Brueckner, R.A. Howard, M.J. Koomen [et al.] // *Sol. Phys.*– 1995. – V. 162.– P. 357–402.
21. Bruevich E.A. Flare activity of the sun and variations in its UV emission during cycle 24. / Bruevich E.A., Yakunina G.V. // *Astrophysics.* – 2017. – V. 60. – P. 387–400
22. Carbonell M. On the asymmetry of solar activity / Carbonell M., Oliver R., Ballester J. L // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 274. – P. 497
23. Chandra R. Blowout jets and impulsive eruptive flares in a bald-patch topology. / Chandra R., Mandrini C.H., Schmieder B., Joshi B. [et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2017. – V. 598. – A41
24. Chen N. Undercover EUV solar jets observed by the interface region imaging spectrograph. / N. Chen, D.E. Innes // *ApJ.* – 2016. – V. 833. – P. 22.
25. Cirtain J.W. Evidence for Alfvén waves in solar X-ray jets. / J.W. Cirtain, L. Golub, L. Lundquist, A. van Ballegoijen [et al.] // *Science.* – 2007. – V. 318. – P. 1580
26. de Toma G. Polar magnetic fields and coronal holes during the recent solar minima. / de Toma, G., // In: Mandrini, C.H., Webb, D.F. (Eds.), *Comparative Magnetic Minima: Characterizing Quiet Times in the Sun and Stars.* In: *IAU Symposium.* – 2012. – V. 286. – P. 101–112.
27. Dubinov A.E. Above the weak nonlinearity: super-nonlinear waves in astrophysical and laboratory plasmas / Dubinov A. E., Kolotkov D. Y. // *Reviews of Modern Plasma Physics.* – 2018. – V.2. – id. 2

28. Ebert R.W. Hemispheric asymmetries in the polar solar wind observed by Ulysses near the minima of solar cycles 22 and 23. / Ebert R.W., Dayeh M.A., Desai M.I., McComas [et al.] // *ApJ*. – 2013. – V. 768. – P. 160
29. Erkaev N.V. Magnetic doublegradient instability and flapping waves in a current sheet / Erkaev N.V., Semenov V.S., Biernat H.K. // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – V. 99. – Iss. 23. – id. 235003.
30. Feng L. Particle kinetic analysis of a polar jet from SECCHI COR data / L. Feng, B. Inhester, J. de Patoul, T. Wiegelmann [et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2012. – V. 538. – A34.
31. Filippov B. X-ray jet dynamics in a polar coronal hole region / Filippov B., Golub L., Koutchmy S. // *Sol. Phys.* – 2009. – V. 254. – P. 259–269.
32. Filippov B. Formation of a white-light jet within a quadrupolar magnetic configuration / Filippov B., Koutchmy S., Tavabi E. // *Sol. Phys.* . – 2013. – V. 286. – P. 143–156
33. Foullon C. X-ray quasi-periodic pulsations in solar flares as magnetohydrodynamic oscillations / Foullon C., Verwichte E., Nakariakov V.M., Fletcher L. // *Astron. Astrophys.* – 2005. – V. 440. – L59
34. 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. – V. 57. – Iss. 8. – id. e2022RS007456
35. Golubeva E.M. Rearrangements of open magnetic flux and formation of polar coronal holes in cycle 24 / E.M. Golubeva, A.V. Mordvinov // *Sol. Phys.*– 2017. – V. 292.– P. 175.
36. Grechnev V. V. Quasi-periodic Pulsations in a Solar Microwave Burst / V. V. Grechnev, S. M. White, M. R. Kundu // *ApJ*. – 2003. – V. – 588. – № 2. – P. 1163–1175
37. Guo M.-Z. Inferring flare loop parameters with measurements of standing sausage modes / Guo M.-Z., Chen S.-X., Li B. [et al.] // *Sol. Phys.* – 2016. – V. 291. – Iss. 3. – P. 877–896.

38. Gurman J.B.. New images of the solar corona. / J.B. Gurman, B.J. Thompson, J.A. Newmark, C.E. Deforest // In: Donahue, R.A., Bookbinder, J.A. (Eds.), Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun. In: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. – 1998. – V. 154. – P. 329
39. Halain J.-P. The SWAP EUV imaging telescope. Part II: in-flight performance and calibration. / Halain J.-P., Berghmans D., Seaton D.B., Nicula B., [et al.] // Sol. Phys. – 2013. – V. 286. – P. 67.
40. Hamada A. Automated identification of coronal holes from synoptic EUV maps / Hamada A., Asikainen T., Virtanen I., Mursula K. // Sol. Phys. – 2018. – V. 293. – P. 71
41. Hathaway D.H. The solar cycle / Hathaway D.H. // Living Rev. Solar Phys.. – 2015. – V. 12. – P. 4
42. Hayes L.A. Quasiperiodic pulsations during the impulsive and decay phases of an X-class flare / Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R. [et al.] // The Astrophys. J. Lett. – 2016. – V. 827. – Iss. 2. – id. L30.
43. Hayes L.A. Persistent Quasi-periodic pulsations during a large X-class solar flare / Hayes L.A., Gallagher P.T., Dennis B.R. [et al.] // ApJ. – 2019. – V. 875. – Iss. 1. – Id. 33
44. Hong J. A micro coronal mass ejection associated blowout extreme-ultraviolet jet / J. Hong, Y. Jiang, R. Zheng, J. Yang [et al.] // Astrophys. J. Lett. – 2011. – V. 738. – L20
45. Hong J. Twistin a polar blowout jet / J. Hong, Y. Jiang, R. Zheng, J. Yang [et al.] // Res. Astron. Astrophys. – 2013. – V. 13. – P. 253–258.
46. 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. – V.136. – Iss. 1-4. – P. 67–115
47. Huang N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang., Zh. Shen, S. R.



- Long, M. C. Wu [et al.] // Royal Society of London Proceedings Series A. – 1998. – V. 454. – Iss. 1971. – P. 903-998
48. Huang N.E. A review on Hilbert—Huang transform: Method and its applications to geophysical studies / Huang N.E., Wu Z. // *Rev. Geophys.* – 2008. – V. 46. – Iss. 2. – id. RG2006.
49. Inglis A. R. Multi-wavelength spatially resolved analysis of quasi-periodic pulsations in a solar flare / Inglis A. R., Nakariakov V. M., Melnikov V. F. // *Astron. Astrophys.* – 2008. – V. 487. – Iss. 3. – P.1147-1153
50. Inglis A.R. A multi-periodic oscillatory event in a solar flare / Inglis A.R., Nakariakov V.M. // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V. 493. – Iss. 1. – P. 259–266
51. Inglis A. R. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: re-evaluating their nature in the context of power-law flare Fourier spectra / A. R. Inglis, J. Ireland, M. Dominique // *ApJ.* – 2015. – V. 798. – № 2. – P. 108
52. Inglis A. R. A large-scale search for evidence of quasi-periodic pulsations in solar flares / A. R. Inglis, J. Ireland, B. R. Dennis, L Hayes, [et al.] // *ApJ.* – 2016. – V. 833. – № 2. – P. 284
53. Joshi B. Observational and model analysis of a two-ribbon flare possibly induced by a neighboring blowout jet / Joshi B., Thalmann J.K., Mitra P.K., Chandra R. [et al.] // *ApJ.* – 2017. – V. 851. – P. 29.
54. Kane S.R. Acceleration and confinement of energetic particles in the 1980 June 7 solar flare / Kane S.R., Kai K., Kosugi T., Enome S. [et al.] // *ApJ.* – 1983. – V. 271. – P. 376–387.
55. Kashapova L. K. Common Origin of Quasi-Periodic Pulsations in Microwave and Decimetric Solar Radio Bursts / Larisa K. Kashapova, D. Y. Kolotkov, E. G. Kupriyanova, A. V. Kudriavtseva [et al.] // *Sol. Phys.* – 2021. – V. 296. – P. 185
56. Kaufmann P. Rapid Pulsations in Sub-THz Solar Bursts / Kaufmann P., Giménez de Castro C. G., Correia E. [et al.] // *ApJ.* – 2009. – V. 697. – Iss. 1. – P. 420-427

57. Kislyakov A.G. On the Possible Connection between Photospheric 5-Min Oscillation and Solar Flare Microwave Emission / A.G. Kislyakov, V.V. Zaitsev, A.V. Stepanov, S. Urpo // *Sol. Phys.* – 2006. – V. 233. – Iss. 1. – P. 89-106
58. Kolotkov D.Y. Multi-mode quasi-periodic pulsations in a solar flare / Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Kupriyanova E.G. [et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V. 574. – id. A53.
59. Kolotkov D.Y. Nonlinear oscillations of coalescing magnetic flux ropes / Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Rowlands G. // *Phys. Rev. E.* – 2016. – V. 93. – Iss. 5. – id. 053205.
60. Kolotkov D.Y. Quasi-periodic pulsations in the most powerful solar flare of cycle 24 / Kolotkov D.Y., Pugh C.E., Broomhall A.-M., Nakariakov V.M. // *The Astrophys. J. Lett.* – 2018. – V. 858. – Iss. 1. – id. L3.
61. 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 // *ApJ.* – 1977. – V. 213. – P. 278–295.
62. Kundu M.R. Structure and polarization of active region microwave emission / Kundu, M.R., Alissandrakis, C.E. // *Sol. Phys.* – 1984. – V. 94. – P. 249–283
63. Kuznetsov A.A. Simulations of gyrosynchrotron microwave emission from an oscillating 3D magnetic loop / Kuznetsov A.A., Van Doorselaere T., Reznikova V.E. // *Sol. Phys.* – 2015. – V. 290. – P. 1173
64. Lemen J.R. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) / Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. [et al.] // *Sol. Phys.* – 2012. – V. 275. – P. 17–40
65. Lowder C. Measurements of EUV coronal holes and open magnetic flux / Lowder C., Qiu J., Leamon R., Liu Y. // *ApJ.* – 2014. – V. 783. – P. 142.
66. Lowder C. Coronal holes and open magnetic flux over cycles 23 and 24 / Lowder C., Qiu J., Leamon R., // *Sol. Phys.* – 2017. – V. 292. – P. 18

67. Mathioudakis M. White-light oscillations during a flare on II Peg / M. Mathioudakis, J. H. Seiradakis, D. R. Williams, S. Avgoloupis [et al.] // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V. 403. – P. 1101–1104
68. Mariska J. T. Observations of Solar Flare Doppler Shift Oscillations with the Bragg Crystal Spectrometer on Yohkoh / Mariska J. T. // *ApJ.* – 2005. – V. 620. – Issue 1. – L67-L70.
69. Melnikov V.F. Spatially resolved microwave pulsations of a flare loop / Melnikov V.F., Reznikova V.E., Shibasaki K., Nakariakov V.M // *Astron. Astrophys.* . – 2005. – V.439. – P. 7
70. Mercier C. The structure of solar radio noise storms / Mercier C., Subramanian P., Chambe G., Janardhan P. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V. 576. – A136.
71. McComas D.J. Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit / McComas D.J., Barraclough B.L., Funsten H.O., Gosling J.T. [et al.] // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2000. – V. 105. – A5. – P. 10419–10433.
72. Moore R.L., Dichotomy of solar coronal jets: Standard jets and blowout jets / R.L. Moore, J.W. Cirtain, A.C. Sterling, D.A. Falconer // *ApJ.* – 2010. – V. 720. – P. 757–770
73. Moore R.L., The cool component and the dichotomy, lateral expansion, and axial rotation of solar x-ray jets / R.L. Moore, A.C. Sterling, D.A. Falconer, D. Robe // *ApJ.* – 2013. – V. 769. – P. 134
74. Moore R.L. Onset of the magnetic explosion in solar polar coronal x-ray jets / Moore, R.L., Sterling, A.C., Panesar, N.K., // *ApJ.* – 2018. – V. 859. – P. 3
75. Mordvinov A.V. Reversals of the sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes / Mordvinov, A.V., Yazev, S.A., // *Sol. Phys.* – 2014. – V. 289. – № 6. – P. 1971–1981
76. Murray M.J. Simulations of emerging flux in a coronal hole: oscillatory reconnection / Murray M.J., van Driel-Gesztelyi L., Baker D // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V. 494. – Iss. 1. – P. 329–337

77. Nakajima H. The Nobeyama radioheliograph / H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome [et al.] // Proc. IEEE. – 1994. – V. 82. – Iss. 5. – P. 705–713.
78. Nakariakov V.M. Quasi-periodic modulation of solar and stellar flaring emission by magnetohydrodynamic oscillations in a nearby loop / Nakariakov V.M., Foullon C., Verwichte E., Young N.P. // Astron. Astrophys. – 2006. – V. 452. – P. 343
79. Nakariakov V.M. Oscillatory processes in solar flares / Nakariakov V.M., Inglis A.R., Zimovets I.V. [et al.] // Plasma Phys. and Controlled Fusion. – 2010a. – V. 52. – Iss. 12. – id. 124009.
80. Nakariakov V. M. Quasi-Periodic Pulsations in the Gamma-Ray Emission of a Solar Flare / Nakariakov V. M., Foullon C., Myagkova I. N., Inglis A. R. // The Astrophys. J. Lett. – 2010b. – V. 708. – Iss. 1. – L47-L51
81. Nakariakov V.M. Slow magnetoacoustic waves in two-ribbon flares / Nakariakov V.M., Zimovets I.V. // The Astrophys. J. Lett. – 2011. – V. 730. – Iss. 2. – id. L27
82. Nakariakov V. M. Sausage oscillations of coronal plasma structures / V. M. Nakariakov, C. Hornsey, V. F. Melnikov // The Astrophysical Journal. – 2012. – V. 761. – P. 134
83. Nakariakov V.M. Non-stationary quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares / Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y., Kupriyanova E.G., [et al.] // Plasma Phys. and Controlled Fusion. – 2019. – V. 61. – id. 014024
84. Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares / Neupert, W.M. // Astrophys. J. Lett. – 1968. – V. 153. – L59
85. Nisticò G. Characteristics of EUV coronal jets observed with STEREO/SECCHI / G. Nisticò, V. Bothmer, S. Patsourakos, G. Zimbardo // Sol. Phys. – 2009. – V. 259. – P. 87–108.
86. Nisticò G. Observational features of equatorial coronal hole jets / G. Nisticò, V. Bothmer, S. Patsourakos, G. Zimbardo // Ann. Geophys. – 2010. – V. 28. – P. 687–696

87. Nisticò G. Determination of temperature maps of EUV coronal hole jets / Nisticò, G., Patsourakos, S., Bothmer, V., Zimbardo, G., // *Adv. Space Res.* – 2011. – V. 48. – P. 1490–1498.
88. Nita G. M. Statistical study of two years of solar flare radio spectra obtained with the Owens Valley Solar Array / G. M. Nita, D. E. Gary, J. Lee // *ApJ.* – 2004. – V. 605. – P. 528–545
89. Panesar N.K. Magnetic flux cancellation as the trigger of solar coronal jets in coronal holes / Panesar N.K., Sterling A.C., Moore R.L. // *ApJ.* – 2018. – V. 853. – P. 189
90. Paraschiv A.R. Study of coronal jets during solar minimum based on STEREO/SECCHI observations / Paraschiv A.R., Lacatus D.A., Badescu T., Lupu M.G. [et al.] // *Sol. Phys.* – 2010. – V. 264. – P. 365–375
91. Patsourakos S. STEREO SECCHI Stereoscopic observations constraining the initiation of polar coronal jets / S. Patsourakos, E. Pariat, A. Vourlidas, Antiochos [et al.] // *ApJ.* – 2008. – Lett. 680. – L73.
92. Petrie G.J.D. Solar magnetism in the polar regions. / Petrie, G.J.D., // *Living Rev. Solar Phys.* – 2015. – V. 12. – P. 5
93. Plowman J. Fast differential emission measure inversion of solar coronal data / J. Plowman, Ch. Kankelborg, P. Martens // *ApJ.* – 2013. – V. 771. – № 1
94. Pugh C.E. Multiperiod oscillation in a stellar superflare / Pugh C.E., Nakariakov V.M., Broomhall A.-M.A // *The Astrophys. J. Lett.* – 2015. – V. 813. – Iss. 1. – id. L5.
95. Quinones J.A. Observations of the solar eclipse on March 7, 1970 with the polarimeter of the Havana Radio Astronomical Station at 4.5 cm / Quinones J.A., Korzhavin A.N., Peterova N.G., Santos J. // *Soln. Dannye.* – 1975. – № 3. – P. 87–96
96. Raouafi N.. On the relationship between polar coronal jets and plumes. / Raouafi N. // In: Lites, B., Cheung, M., Magara, T., Mariska, J., Reeves, K. (Eds.), *The*

- Second Hinode Science Meeting: Beyond Discovery-Toward Understanding. In: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. – 2009. – V. 415. – P. 144
97. Reznikova V.E. Diagnostics of MHD-oscillation modes of a flaring loop using microwave observations with high spatial resolution / Reznikova V.E., Nakariakov V.M., Melnikov V.F., Shibasaki K. // *Proc. 11th European Solar Physics Meeting “The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations”* (ESA SP-600). 11–16 September 2005, Leuven, Belgium. – id. 140. – P.1
98. Reznikova V.E. Flare quasi-periodic pulsations with growing periodicity / Reznikova V.E., Shibasaki K. // *Astron. Astrophys.* – 2011. – V. 525. – id. A112.
99. Roy J. The north-south distribution of major solar flare events, sunspot magnetic classes and sunspot areas (1955–1974) / Roy J. // *Sol. Phys.* – 1977. – 52. – P. 53–61.
100. Rudenko I.G. Radio source above neutral line in active regions generating long-lasting X flares / Rudenko I.G., Rudenko G.V., Uralov A.M. // *Trudy Vserossiiskoi konferentsii “Mnogovolnovye issledovaniya Solntsa i sovremennye problemy solnechnoi aktivnosti”* [Proc. All-Russian Conference “Multiwavelength Investigations of the Sun and Modern Problems of Solar Activity”]. Russia, N. Arkhyz, St. Petersburg. – 2007. – P. 462–474. (In Russian)
101. Rudenko G.V. Analysis of reconstruction methods for nonlinear force-free fields / Rudenko G.V., Myshyakov I.I. // *Sol. Phys.* – 2009. – V. 257. – Iss. 2. – P. 287–304
102. Sako N. A statistical study of coronal active events in the north polar region / Sako N., Shimojo M., Watanabe T., Sekii // *ApJ*. – 2013. – V. 775. – P. 22.
103. Savcheva A. A study of polar jet parameters based on hinode XRT observations. / A.Savcheva, J. Cirtain, E.E. Deluca, L.L. Lundquist [et al.] // *Publ. Astron. Soc. Japan*. – 2007. – V. 59. – S771–S778
104. Scherrer P.H. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) / Scherrer P.H., Schou J. Bush R.I. [et al.] // *Sol. Phys.* – 2012. – V. 275. – Iss. 1-2. – P. 207–227

105. Seaton D.B. The SWAP EUV imaging telescope part I: instrument overview and pre-flight testing / Seaton D.B., Berghmans D., Nicula B., Halain J.-P. [et al.] // Sol. Phys. – 2013. – V. 286. – P. 43
106. 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.] // ApJ. – 1997. – V. 484. – P. 472–478
107. Shibata K. Observations of x-ray jets with the YOHKOH soft x-ray telescope / K. Shibata, Y. Ishido, L.W. Acton, K.T. Strong [et al.] // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1992. – V. 44. – L173–L179.
108. Shimojo M. Statistical study of solar x-ray jets observed with the YOHKOH soft x-ray telescope / M. Shimojo, S. Hashimoto, K. Shibata, Hirayama [et al.] // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1996. – V. 48. – 123–136
109. Shimojo M. Observational evidence of magnetic reconnection in solar x-ray jets / M. Shimojo, K. Shibata // Adv. Space Res. – 2000. – V. 26. – P. 449–452.
110. Simões P.J.A. Soft X-ray pulsations in solar flares / Simões P.J.A., Hudson H.S., Fletcher L. // Sol. Phys. – 2015. – V. 290. – P. 3625
111. Somov B. V. Non-neutral current sheets and solar flare energetics / B. V. Somov // Astronom. Astrophys. – 1986. – V.163. – P. 210
112. 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.] // Sol. Phys. – 2012. – V. 276. – P. 261–276
113. Srivastava A. K. Observation of multiple sausage oscillations in cool post-flare loop / Srivastava A. K., Zaqarashvili T. V., Uddin W., Dwivedi B. N. [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – V. 388. – Iss. 4. – P. 1899–1903
114. 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.] // In: Wilson, A. (Ed.), 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. – V. 415. – P. 103
115. Sterling A.C. Solar spicules: A review of recent models and targets for future observations - (invited review) / A.C. Sterling // *Sol. Phys.* – 2000. – V.196. – P. 79–111
116. Sterling A.C. Small-scale filament eruptions as the driver of x-ray jets in solar coronal holes / Sterling A.C., Moore R.L., Falconer D.A., Adams M. // *Nature.* – 2015. – V. 523. – P. 437–440
117. Stewart G.A. Solar flare activity and the structure of the coronal neutral line / G.A. Stewart, S. Bravo // *Sol. Phys.* – 1995. – V. 160. – P.331–341
118. Svalgaard L. Asymmetric solar polar field reversals / Svalgaard L., Kamide Y. // *ApJ.* – 2013. – V. 763. – P. 23.
119. Tajima T. Current loop coalescence model of solar flares / Tajima T., Sakai J., Nakajima H., [et al.] // *ApJ.* – 1987. – V. 321. – P. 1031–1048.
120. Takasao S. Above-the-loop-top oscillation and quasi-periodic coronal wave generation in solar flares / Takasao S., Shibata K. // *ApJ.* – 2016. – V. 823. – Iss. 2. – id. 150.
121. Tan C. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-Sun radio emission / Tan C., Yan Y., Tan B., Fu Q. [et al.] // *ApJ.* – 2015. – V. 808. – P. 61
122. Tanaka H. The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares / Tanaka H., Enome Sh. // *Sol. Phys.* – 1975. – V. 40. – P. 123–134
123. Tokumaru M. Global Distribution of the Solar Wind Speed Reconstructed from Improved Tomographic Analysis of Interplanetary Scintillation Observations between 1985 and 2019 / M. Tokumaru , K. Fujiki , M. Kojima, and K. Iwai // *ApJ.* – 2021. – V. 922. –P. 73
124. Torrence C. A practical guide to wavelet analysis / Torrence, C., Compo, G.P. // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 1998. – V. 79. – P. 61.



125. Uralov A.M. 17 GHz neutral line associated sources: birth, motion, and projection effect. / Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. // *Publ. Astron. Soc. Japan.* – 2006. – V. 58. – P. 21
126. 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 // *Sol. Phys.* – 2008. – V. 249. – P. 315–335.
127. 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 // *Sol. Phys.* – 2016. – V. 291. – Iss. 11. – P. 3143–3164
128. Waldmeier M. The asymmetry of solar activity in the years 1959–1969 / Waldmeier, M., // *Sol. Phys.* – 1971. – V. 20. – № 2. – P. 332–344
129. Wang Y. Origin of streamer material in the outer corona / Wang Y., Sheeley Jr. N.R., Walters J.H., Brueckner G.E. [et al.] // *Astrophys. J. Lett.* – 1998a. – V. 498. – № 2. – L165
130. Wang Y. Observations of correlated white-light and extreme-ultraviolet jets from polar coronal holes / Y. Wang, N.R. Sheeley Jr., D.G. Socker, R.A. Howard [et al.] // *ApJ.* – 1998b. – V. 508. – P. 899–907
131. Wheatland M.S. An optimization approach to reconstructing force-free fields / Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G. // *ApJ.* – 2000. – Vol. 540. – Iss. 2. – P. 1150–1155.
132. Wang Y. Coronal white-light jets near sunspot maximum / Y. Wang, N.R. Sheeley, Jr. // *ApJ.* – 2002. – V. 575. – P. 542–552
133. Wang H. Strong transverse photosphere magnetic fields and twist in light bridge dividing delta sunspot of active region 12673 / Wang H., Yurchyshyn V., Liu C. [et al.] // *Res. Notes Amer. Astron. Soc.* – 2018. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 8.
134. Wood B.E. Kinematic measurements of polar jets observed by the large-angle spectrometric coronagraph. / B.E. Wood, M. Karovska, J.W. Cook, Howard [et al.] // *ApJ.* – 1999. – V. 523. – P. 444–449.

135. Yamauchi Y. Study of  $h\alpha$  macrospicules in coronal holes: Magnetic structure and evolution in relation to photospheric magnetic setting / Y. Yamauchi, H. Wang, Y. Jiang, N. Schwadron [et al.] // *ApJ*. – 2005. – V. 629. – P. 572–581
136. Yan Y. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies / Yan Y., Chen Z., Wang W., Liu F. [et al.] // *Front. Astron. Space Sci.* – 2021. – V.8. – P. 20.
137. Young P.R. Solar dynamics observatory and hinode observations of a blowout jet in a coronal hole / P.R. Young, K. Muglach // *Sol. Phys.* – 2014. – V. 289. – P. 3313–3329
138. 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.] // *ApJ*. – 2014. – V. 784 – P. 166
139. Zhdanov D.A. Broadband microwave spectropolarimeter / Zhdanov D.A., Zandanov V.G. // *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* . – 2011. – V. 35. – 223
140. Zimovets I. V. Imaging Observations of Quasi-Periodic Pulsatory Nonthermal Emission in Two-Ribbon Solar Flares / Zimovets I. V., Struminsky A. B. // *Sol. Phys.* – 2009. – V. 258. – Iss. 1. – P. 69-88
141. CME list STEREO [Электронный ресурс]. // Сайт каталога KBM по данным КА STEREO: сайт. -URL: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi.php> / (дата обращения 02.08.2023)
142. CME list SOHO [Электронный ресурс]. // Сайт каталога 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)
143. STEREO mission [Электронный ресурс]. // Сайт миссии STEREO: сайт. -URL: <http://stereo.gsfc.nasa.gov/mission/mission.shtml> (дата обращения 10.08.2023)
144. SSW [Электронный ресурс]. // SolarSoftWare: сайт. -URL: <http://www.lmsal.com/solarsoft> (дата обращения 06.10.2023)

- 145.SRH corrplot [Электронный ресурс]. // Ежедневные данные СРГ (корреляционные кривые): сайт. -URL: [badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php](http://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php) (дата обращения 30.09.2023)
- 146.NoRH data [Электронный ресурс]. // Данные Радиогелиографа Нобеяма: сайт. -URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/images/daily/> (дата обращения 22.09.2023)
- 147.Sunspot number [Электронный ресурс]. // WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels: сайт. -URL: <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles> (дата обращения 05.10.2023)

**Приложение.**