МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Кириченко Алексей Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНЫХ МИКРОВСПЫШКАХ

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Mockba - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение оптики, Лаборатория "Рентгеновская астрономия Солнца"

Научный руководитель:	Богачёв Сергей Александрович доктор физмат. наук, профессор РАН
Официальные оппоненты:	Сомов Борис Всеволодович — доктор физмат. наук, профессор, МГУ имени М.В.Ломоносова, Государствен- ный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Отдел Физики Солн- ца, заведующий отделом
	Нусинов Анатолий Абрамович — доктор физмат. наук, старший науч- ный сотрудник, ФГБУ Институт при- кладной геофизики им. Е.К. Фёдоро- ва Федеральной службы по гидроме- теорологии и мониторингу окружаю- щей среды (Росгидромет), Лаборато- рия солнечно-земных связей, заведую- щий лабораторией
	Шарыкин Иван Николаевич — кандидат физмат. наук, ФГБУН Ин- ститут космических исследований РАН, Отдел Физики космической плазмы, на- учный сотрудник
	ед ЭОЭО д. р.

Защита диссертации состоится "______ 2020 г. в "_____" ч. на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета по адресу: г. Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 19 корп. МГУ, ауд. 2-15 E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС "ИСТИНА": https://istina.msu.ru/dissertations/319497001/

Автореферат разослан "_____"____ 2020 г. Учёный секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук

Н. А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Солнечные вспышки являются одним из наиболее известных проявлений солнечной активности. По своей сути вспышки представляют собой процессы быстрого энерговыделения, сопровождающиеся нагревом плазмы от 2-3 миллионов К (МК), что лишь немногим превосходит температуру спокойной короны, до значений порядка 100 МК [1–5]. Во время вспышек также происходит ускорение заряженных частиц, преимущественно электронов и протонов, вплоть до релятивистских энергий [6–8], а также наблюдаются корональные выбросы массы (КВМ), сопровождающиеся попаданием значительных объемов солнечного вещества в межпланетное пространство [9,10].

Известно и широко исследуется воздействие вспышек на верхнюю атмосферу и магнитное поле Земли [11–13]. Так, приход к Земле КВМ почти всегда сопровождается геомагнитными возмущениями, что может приводить к сбоям в работе систем связи и энергетических систем. По этой причине большое внимание привлекает задача прогнозирования вспышек.

Не менее значимыми являются фундаментальные научные вопросы, связанные с тематикой солнечной активности. Наиболее известный из них – нерешенная проблема формирования горячей короны Солнца и, соответственно, горячих атмосфер звезд солнечного типа. Важное значение экспериментальные исследования Солнца имеют для физики плазмы и атомной спектроскопии. Солнце, по своей сути, является природной лабораторией большого масштаба, в которой возможно наблюдение плазмы и неионизованного вещества в широком диапазоне состояний. Многие параметры таких сред не могут быть воспроизведены в земных условиях. В первую очередь, это касается масштабов протекающих явлений, а также сочетания низкой плотности ($10^8 - 10^{10}$ см⁻³) и высокой температуры (от 1-100 MK), которые характерны для солнечной короны и процессов солнечной активности.

Физические параметры солнечных вспышек показывают достаточно большой разброс, что вызывает объективную необходимость в их систематизации. Наиболее распространенной на сегодняшний день является классификация GOES, согласно которой вспышки делятся на пять классов, в зависимости от интенсивности их излучения в мягком рентгеновском диапазоне 1-8 Å: X (10^{-4} BT m⁻²), M (10^{-5} BT m⁻²), C (10^{-6} BT m⁻²), B (10^{-7} BT m⁻²), A (10^{-8} BT m⁻²). Также вспышки можно разделить на три группы по высвобождающейся в них полной энергии: крупные и средние вспышки (10^{30} - 10^{33} эрг), микровспышки (10^{27} - 10^{30} эрг) и нановспышки (10^{24} - 10^{27} эрг). К первой категории прибли-

зительно относятся [14] вспышки классов X, M и C, ко второй - A и B. Третья группа (нановспышки) не имеет пересечений с классификацией GOES.

Факт формирования горячей плазмы в обычных и крупных вспышках в настоящее время не вызывает сомнений – такая плазма прямо видна на изображениях Солнца в мягком рентгеновском диапазоне. В то же время, применительно к более слабым вспышечным процессам возникают уже заметные трудности. Так, несмотря на большой экспериментальный материал, полученный в ходе космических экспериментов двух последних десятилетий, прямые свидетельства формирования высокотемпературной плазмы в микровспышках пока не были предоставлены. В немногочисленных работах, где делаются попытки измерить температуру плазмы в микровспышках, по факту рассматриваются события достаточно высокого рентгеновского класса В и С [15–17].

Получение новых экспериментальных данных о высокотемпературной плазме в мировспышках более низких рентгеновских классов (А и ниже) может способствовать прогрессу в решении ряда вопросов современной физики Солнца и астрофизики. В качестве одного из них можно отметить вопрос о формировании долгоживущих областей высокотемпературной плазмы как в короне Солнца, так и в атмосферах звезд солнечного типа. Речь идет о многочисленных наблюдениях длительного (много дольше, чем характерное время охлаждения) существования в короне Солнца плазмы с температурой около и выше 4 МК, формирование которой может происходить, в том числе в ходе микро- и нановспышек [2,18,19]. Еще одним существенным вопросом является участие микровспышек в процессах выброса плазмы из короны в межпланетное пространство. В работе Яширо [20] была получена зависимость вероятности наблюдения КВМ от рентгеновского класса события и показано, что во вспышках слабее класса В5 КВМ не наблюдались. Подтверждение возможности выбросов массы в событиях класса А и ниже представляет интерес с точки зрения солнечно-земной физики, так как открывает дополнительные возможности для поиска источников транзиентного солнечного ветра.

Одним из наиболее важных вопросов современной физики солнечной и звездных атмосфер является проблема коронального нагрева [21]. До сих пор неясно, за счет чего поддерживается высокая температура спокойной короны (1-2 MK) звезд солнечного типа. На сегодняшний день одной из наиболее вероятных гипотез является возможность нагрева корональной плазмы множественными слабыми вспышечными событиями [22]. Получение прямого подтверждения формирования плазмы высокой температуры во вспышках низких энергий, несомненно, существенно усилит данную теорию. В проведенном диссертационном исследовании получен и представлен ряд новых экспериментальных результатов в области физики микровспышек, в том числе для событий рекордно низких рентгеновских классов. Исследование проведено на основе данных современных космических средств наблюдения, включая результаты российских космических экспериментов. Подтверждена существенная роль процессов нагрева плазмы в общей энергетике слабых солнечных вспышек. Полученные результаты позволяют лучше понять механизмы формирования высокотемпературной компоненты, а также, в целом, способствуют прогрессу в понимании физики солнечной и звездных атмосфер.

Цели и задачи исследования

Цель работы заключалась в уточнении основных характеристик микровспышек по новым данным отечественных и зарубежных космических экспериментов. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи.

- В части научных задач:
- Измерить и исследовать характеристики плазмы в обнаруженных высокотемпературных источниках излучения и проанализировать зависимость параметров плазмы от рентгеновского класса микровспышки.
- Выделить и исследовать события длительного нагрева плазмы в микровспышках и установить или опровергнуть связь таких событий с мелкомасштабными выбросами массы.
- 3. Провести системное исследование характеристик фотосферного магнитного поля в областях формирования микровспышек и исследовать связь параметров поля с энерговыделением. Сравнить полученные соотношения с результатами для более крупных вспышек, а также для иных солнечных и звездных объектов – активных областей, ярких рентгеновских точек и других.
- В части методологических задач:
- Разработать алгоритм первичной обработки изображений спектрогелиометра MISH на космическом аппарате(КА) КОРОНАС-Фотон – единственного в мире монохроматического изображающего инструмента, предоставлявшего данные о солнечной плазме с температурой более 4 MK.
- Создать алгоритм автоматического поиска событий нагрева плазмы на сериях космических изображений с числом кадров от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч. Разработать методику определения положения высокотемпературных источников излучения на диске Солнца.

- 3. Разработать метод и провести абсолютную калибровку использовавшихся в исследовании данных спектрофотометра SphinX на KA КОРОНАС-Фотон.
- Разработать метод автоматического измерения силы и потока фотосферного магнитного поля в области мелкомасштабных вспышек по сериям изображений с большим числом кадров.
- 5. Разработать метод измерения температуры плазмы и ее меры эмиссии по данным MISH и SphinX в рамках однотемпературной и двухтемпературной модели излучения.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования выбраны солнечные вспышки низких рентгеновских классов (микровспышки). Предметом исследования является процесс формирования высокотемпературной плазмы в микровспышках.

Научная новизна

- Впервые получены доказательства формирования высокотемпературной (Т > 4 МК) корональной плазмы в микровспышках рентгеновского класса А и ниже. Зарегистрированы многочисленные факты такого нагрева.
- 2. Впервые для солнечных микровспышек класса А и ниже обнаружены признаки эруптивных процессов (выбросов корональной массы). В найденных событиях показана возможная связь между эрупцией вещества и длительным поддержанием высокой температуры плазмы в течение времени, существенно превышающего время охлаждения плазмы.
- 3. Впервые для солнечных микровспышек получена зависимость температуры плазмы от рентгеновского класса события. Показано, что фактический нагрев плазмы в микровспышках происходит до гораздо более высоких температур, чем ранее предсказывавшиеся значения, полученные путем экстраполяции результатов для обычных вспышек в область событий с меньшим потоком рентгеновского излучения.
- 4. Впервые определен минимальный рентгеновский класс вспышки, начиная с которого возможен нагрев корональной плазмы до температур выше фоновых значений.
- 5. Впервые для солнечных микровспышек определен вид зависимости их энергетических характеристик от параметров фотосферного магнитного поля.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в установлении ряда новых, ранее не известных фактов об основных параметрах и энергетике солнечных микровспышек. Среди них можно отметить обнаружение высокотемпературной компоненты излучения во вспышках низких рентгеновских классов, которая представляет интерес с точки зрения ряда фундаментальных проблем современной солнечной физики. Установленная температура микровспышек и их общая энергетика оказались существенно выше ранее предполагавшихся значений, что создает теоретические предпосылки для модификации существующих моделей вспышек и моделей нагрева плазмы в короне. Важным результатом для построения теоретических моделей является оценка минимального рентгеновского класса микровспышки, начиная с которого регистрируется нагрев корональной плазмы выше фоновых значений. Можно отметить также, что обнаружение в микровспышках КВМ подтверждает теоретические предположения о схожей природе обычных вспышек и вспышек низких рентгеновских классов.

Практическая значимость работы состоит в разработке значительного числа новых методов обработки данных, которые могут значительно упростить дальнейшие исследования в данной области и, соответственно, способствовать прогрессу в соответствующем направлении. Кроме того, результаты, полученные в рамках проведенного исследования, могут быть полезны при планировании будущих космических экспериментов, в том числе собственных экспериментов ФИАН. Отметим, что обнаружение КВМ в событиях класса A и ниже представляет существенный интерес с точки зрения солнечно-земных связей. В частности, с учетом большой частоты возникновения, микровспышки могут вносить существенный вклад в формирование солнечного ветра.

Методология диссертационного исследования

Работа была проведена по данным отечественных и зарубежных изображающих и спектральных приборов в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) и мягком рентгеновском (МР) диапазонах. При обработке кадров использовались методы частотной фильтрации, интерполяции и контурного анализа. Диагностика плазмы проводилась в рамках одно- и двухтемпературного приближений с использованием атомной базы CHIANTI [23]. При анализе спектров излучения выполнялось решение обратных задач с использованием методов регуляризации.

Положения, выносимые на защиту:

- 1. Формирование высокотемпературной плазмы с T > 4 МК в микровспышках низких рентгеновских классов (А и ниже).
- Развитие корональных выбросов массы в микровспышках низких рентгеновских классов. Их возможная связь с механизмом длительного поддержания высокой температуры в микровспышках (в течение времени, существенно превышающего время теплопроводного охлаждения).
- 3. Наличие степенной зависимости потока излучения микровспышек в диапазоне 1-8 Å (*PFF* – "Peak Flare Flux", пиковый вспышечный поток) от средней силы фотосферного магнитного поля, *B*, (*PFF* ~ $B^{3.87\pm2.16}$) и от полного беззнакового магнитного потока, Φ , (*PFF* ~ $\Phi^{3.0\pm1.6}$).
- 4. Степенной вид зависимости между рентгеновским классом и температурой формирующейся вспышечной плазмы для вспышек и микровспышек в рамках одно- и двухтемпературных моделей – log₁₀ PFF = -11.54 ± 0.67 + (5.16 ± 1.02) log₁₀T и log₁₀ PFF = -13.29 ± 1 + (7.18 ± 1.45) log₁₀T, соответственно. Минимальный рентгеновский класс вспышки, способной нагревать плазму до температуры, превышающей температуру спокойной короны Солнца – класс A0.0002.
- 5. Наличие степенной зависимости потока излучения безвелышечных активных областей в диапазоне 2.8–36.6 Å, F_x , от средней силы фотосферного магнитного поля, B, $(F_x \sim B^{1.98\pm1.15})$ и от полного беззнакового магнитного потока, Φ , $(F_x \sim \Phi^{1.48\pm0.86})$.

Степень достоверности

Достоверность полученных в настоящей работе результатов обеспечивается хорошей согласованностью данных различных инструментов. Так, результаты температурной диагностики на основании спектров аппаратуры SphinX подтверждаются наблюдательными данными спектрогелиометра вблизи линии 8.42Å. Все полученные данные прошли многократную апробацию путем представления их на различных российских и зарубежных конференциях, а также публикацией в ведущих научных изданиях.

Апробация работы

Результаты, представленные в работе, прошли апробацию на следующих отечественных и зарубежных научных конференциях:

- 1. Шестая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", 14-18 февраля 2011 года, Москва
- 2. VIII Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", 14-15 апреля 2011 года, Москва
- 3. Workshop "The Sun: from active to quiet", 29 августа 2 сентября 2011, Москва
- 4я Всероссийская молодежная конференция "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", 14-16 ноября 2011 года, Москва
- 5. IX Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", 12-13 апреля 2012 года, Москва
- 6. Hinode-6 meeting, 14-17 August, 2012, Edinburg, UK.
- 7. "Рентгеновская оптика 2012", 1-4 октября 2012 года, Черноголовка
- 8. Progress on EUV & X-ray spectroscopy and imaging, 20-22 November 2012, Wroclaw, Poland
- 9. Восьмая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", 4-8 февраля 2013 года, Москва
- XVI Consultations on Solar Physics, Poland, Wroclaw, 22-24 May, 2013.
- 11. Workshop. The Sun: Active and Quiet -2013, 16-20 December, 2013, Moscow.
- 12. 40th COSPAR Scientific Assembly, 2-10 August 2014, Moscow
- 13. "VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики", 14-16 ноября 2015 г., ФИАН им П.Н. Лебедева, Москва.
- 14. VIII Международный научный семинар и VI Международная молодежная научная школа-семинар "Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики", 22 июня - 02 июля 2016 г., Великий Новгород.
- 15. 8th Coronal Loops Workshop. "Many facets of magnetically closed corona", 27-30 June 2017 Palermo Italy.
- XXII Международный симпозиум "Нанофизика и наноэлектроника", 12 марта - 15 марта 2018 г. Нижний Новгород.

Личный вклад автора

В ходе выполнения диссертационной работы автор самостоятельно решил все поставленные теоретические и экспериментальные задачи.

Для обработки данных спектрогелиометра MISH на КА КОРОНАС-Фотон [24], автор самостоятельно разработал программное обеспечение для очистки изображений от инструментальных артефактов и для автоматического поиска источников высокотемпературного излучения на обработанных кадрах. Созданные алгоритмы позволили автору впервые обнаружить прямые свидетельства формирования высокотемпературной плазмы в микровспышках низких рентгеновских классов. Автором также разработан и реализован собственный метод калибровки данных спектрофотометра SphinX [25]. Для определения положений высокотемпературных источников излучения на солнечном диске автор самостоятельно разработал алгоритм сопоставления кадров спектрогелиометра MISH и изображений ВУФ телескопов.

Автором был самостоятельно проведен анализ данных, в ходе которого, в частности, были впервые обнаружены 3 чрезвычайно слабых микровспышки с продолжительным энерговыделением на фазе спада.

Автором разработан метод автоматического детектирования микровспышек и определения их параметров, что позволило собрать наибольший на настоящий момент ансамбль из более чем 450 микровспышек различных рентгеновских классов. Для всех этих событий автор собственным методом провел диагностику плазмы в изотермическом и двухтемпературном приближении и нашел зависимость между рентгеновским классом вспышек и температурой и мерой эмиссии вспышек.

Автору также принадлежит решающий вклад в установлении зависимости энергетики микровспышки от характеристик фотосферного магнитного поля.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах в рецензируемых журналах, в том числе в 4 статьях в журналах, индексируемых Web of Science, и 1 статье, индексируемой РИНЦ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 130 наименований. Общий объем диссертации составляет 120 страниц. Диссертация содержит 42 рисунка и 7 таблиц.

Содержание работы

Введение

Во введении обоснована актуальность темы, перечислены цели и основные задачи, определён объект и предмет исследования. Описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и приведена методология проведённого исследования. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также оценена степень достоверности и представлены публикации и конференции, на которых работа прошла апробацию. Указан личный вклад автора в выполненной работе.

Первая глава

В первой главе дается краткий обзор современного состояния исследований в области физики солнечных вспышек, в том числе вспышек низких рентгеновских классов (микровспышек). Рассматриваются основные механизмы нагрева и охлаждения плазмы во вспышках, а также наиболее распространенные способы классификации вспышечных событий. Обсуждаются предыдущие работы других авторов, близкие к теме диссертационного исследования. Приведены зависимости основных характеристик вспышек (температура и мера эмиссии вспышечной плазмы) от рентгеновского класса события. Подчеркивается отсутствие таких данных для вспышек низких рентгеновских классов. Обсуждаются известные данные о связи между параметрами фотосферного магнитного поля Солнца и энергетическими характеристиками различных объектов солнечной атмосферы. Отмечается малое количество работ, в которых данная связь раскрывается для обычных солнечных вспышек, и отсутствие таких исследований для микровспышек. Приведены наиболее важные экспериментальные результаты в части формирования высокотемпературной плазмы в короне Солнца, полученные в ходе спутниковых экспериментов, в частности на зарубежных обсерваториях Yohkoh, RHESSI и Hinode и отечественных спутниках серии KOPOHAC.

Вторая глава

Во второй главе представлены результаты наблюдений высокотемпературной солнечной плазмы с T > 4MK, полученные в ходе проведенного диссертационного исследования на основе данных спектрогелиометра MISH (8.419Åи 8.425Å), работавшего на спутнике КОРОНАС-Фотон. Исследован период глубокого минимума солнечной активности 2009 года,



Рис. 1: Микровспышка 19 апреля 2009 года. (А) Изображения высокотемпературного источника излучения по данным прибора ТЕ-СИС/MISH в линии MgXII 8.42 Å (Б) Профиль МР излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å, полученный рентгеновским монитором GOES с 00:00 до 06:00 UT; (В) Профиль МР Солнца в диапазоне 1–8 Å, зарегистрированный спектрофотометром SphinX.

когда были сформированы особенно благоприятные условия для наблюдения микрособытий в солнечной короне.

Дано описание приборов и экспериментальных данных, использованных в исследовании. Отмечено, что работа основана преимущественно на данных отечественных космических экспериментов, в частности, по материалам, полученным ультрафиолетовыми телескопами FET-1 и FET-2, спектрогелиометром MISH [24] и спектрофотометром SphinX, входившими в состав комплекса научной аппаратуры TECИC на борту спутника КОРОНАС-Фотон. Для исследования высокотемпературной плазмы использовался квазимонохроматический спектрогелиограф MISH, в полосу пропускания которого проникает излучение двух спектральных линий дублета MgXII – 8.419Å и 8.425Å. Принцип работы прибора основан на эффекте отражения Брэгга от сферически изогнутого кристалла кварца при падении на него лучей света под близким к нормальному углу 82°. Заметный поток излучения в рабочем спектральном диапазоне прибора формируется только при температурах плазмы, начиная с 4 MK. Таким образом, сам факт регистрации сигнала по данным MISH позволял сделать вывод о наличии высокотемпературного источника излучения.

Спектральная информация и суммарный поток MP излучения определялись по данным польского спектрофотометра SphinX, также входившего в комплекс научной аппаратуры ТЕСИС. Данный прибор регистрировал спектры излучения в диапазоне энергий 1.2–15 кэВ с высокой чувствительностью, позволявшей различать события с рентгеновским классом на порядок ниже уровня А.

В последнем разделе главы 2 представлены результаты поиска свидетельств формирования высокотемпературной плазмы в солнечных микровспышках. Всего по данным MISH за март и апрель 2009 года было обнаружено несколько десятков высокотемпературных источников излучения. В момент их регистрации в значительном числе случаев поток МР излучения GOES находился ниже порога чувствительности. При сравнении полученных результатов с данными SphinX, имевшего значительно большую чувствительность, было установлено, что, как минимум, часть обнаруженных источников связана с микровспышками рентгеновского класса А и ниже. Пример обнаруженной таким образом микровспышки (событие от 19 апреля 2009 года) показан на Рисунке 1 [А1, А2]. Таким образом, впервые были получены прямые свидетельства эффективного нагрева плазмы до температуры не менее 4 МК в микровспышках рентгеновского класса А и ниже. Данный результат представляет интерес с точки зрения целого ряда фундаментальных проблем солнечной физики, например проблемы коронального нагрева или нагрева плазмы в активных областях.

Третья глава

Третья глава посвящена изучению фактов продолжительного нагрева в микровспышках низких рентгеновских классов [A3]. Несмотря на низкий уровень солнечной активности, в первой половине 2009 года по данным приборов ТЕСИС было обнаружено множество микровспышек, сопровождавшихся нагревом плазмы до температур 4 МК и выше. При этом в некоторых событиях высокотемпературная плазма наблюдалась спустя несколько часов после максимума вспышки. Было высказано предположение, что поддержание температуры в микровспышках может осуществляться тем же механизмом, что и в крупных вспышках LDE-типа (long decay event – событие с продолжительной фазой спада), подразумевающим длительное магнитное пересоединение, сопровождающее выбросы корональной массы (KBM). Ранее KBM в микровспышках таких классов не обнаруживались. Для проверки были использо-



Рис. 2: Микровспышка от 24 июня 2009 года с продолжительным энерговыделением. Верхняя панель - изображения источника высокотемпературного излучения по данным спектрогелиометра MISH. Нижняя панель - разностные изображения вспышки по данным ВУФ телескопа FET.

ваны наблюдения с апреля по июль 2009 года следующих приборов ТЕСИС : спектрогелиограф MISH, спектрофотометр SphinX и ультра-

фиолетовые телескопы FET. Всего за выбранный период было найдено 3 микровспышки, хорошо разрешимые по времени и сопровождавшиеся длительным существованием высокотемпературной плазмы: событие уровня A0.38 от 19 апреля, событие уровня A0.47 от 24 июня и событие уровня A2.2 от 18 июля. В качестве признаков выброса корональной массы использовались димминги (области пониженной яркости, возникающие из-за ухода вещества из короны) на разностных изображениях телескопа FET. Данный метод позволяет устанавливать факт эрупции даже в тех случаях, когда выброс невозможно наблюдать с помощью коронографов.

Для каждой из трех микровспышек были получены и представлены следующие результаты: 1) изображения высокотемпературного источника в линии MgXII λ 8.42 Å, (данные спектрогелиометра MISH); 2) разностные изображения вспышки (данные прибора FET в линии FeIX λ 171 Å); 3) временной профиль потока излучения вспышки в линии MgXII λ 8.42 Å; 4) временной профиль потока излучения в линии FeIX λ 171 Å, проинтегрированный по области димминга; 5) поток мягкого рентгеновского излучения вспышки в области длин волн 1–8 Å(данные спектрофотометра SphinX). На Рисунке 2 показан один из высокотемпературных источников излучения, исследованных в рамках настоящей работы. В целом, горячая плазма в данном событии регистрировалась в течение почти 45 мин, в том числе не менее 25 мин после максимума вспышки.

Для всех трёх микровспышек была проведена диагностика плазмы в изотермическом приближении и оценено время теплопроводного охлаждения [21]. Время охлаждения плазмы рассчитывалось как время уменьшения ее температуры от первоначального расчетного значения до уровня 4 МК, что соответствует нижней границе температурной чувствительности спектрогелиометра MISH, по следующей формуле:

$$T(t) = T_1 \left[1 - \frac{(t - t_1)}{\tau_{cond}} \right]^{-2/5},$$
(1)

где

$$\tau_{cond} = \frac{21}{5} \frac{\langle n_e \rangle k_B L^2}{\kappa T_1^{5/2}}.$$
(2)

Здесь k_B – постоянная Больцмана, κ – спитцеровская теплопроводность, L – характерный линейный размер горячей области, n_e – электронная концентрация. По проведенным оценкам время жизни горячей плазмы для трех событий не превышало 30, 40 и 80 секунд, в то время как реальное время наблюдения составляло несколько десятков минут. Это достаточно убедительно показывает необходимость дополнительного энерговыделения на фазе спада. В работе приведены аргументы в пользу того,



Рис. 3: Слева: параметр PFF в диапазоне 1-8 Å как функция средней силы магнитного поля по нашим данным (круги) и по данным работы Су (квадраты). Справа: PFF в диапазоне 1-8 Å как функция потока магнитного поля по нашим данным (круги) и по данным работы Су (квадраты).

что источником энерговыделения может быть медленное магнитное пересоединение, вызванное эрупцией вещества из области микровспышки. Для вспышек рентгеновского класса А признаки КВМ были обнаружены впервые.

Четвертая глава

В четвертой главе представлены результаты исследования связи между характеристиками микровспышек (а также мелкомасштабных безвспышечных активных областей) и параметрами фотосферного магнитного поля [A4].

В первой части главы описан метод обработки экспериментальных данных приборов, использовавшихся при исследовании: магнитометра MDI на борту SOHO, спектрогелиометра MISH, телескопа FET-1 и спетрофотометра SphinX. Представлены методики определения параметров магнитного поля (магнитной индукции и беззнакового магнитного потока) по магнитограммам MDI в пределах вспышечных областей, контуры которых определялись с помощью изображений телескопа FET-1. В качестве энергетических характеристик микровспышек и безвспышечных активных областей выбран поток излучения в следующих спектральных диапазонах: 2.8–36.6 Å(по данным SphinX), 1–8 Å (по данным SphinX) и 8.42 Å(по данным MISH). Отмечено, что диапазон 2.8–36.6 Å лучше подходит для анализа безвспышечных областей, в то время как 1– 8 Å и 8.42 Å наиболее удобны при исследовании вспышечных явлений. В разделе обосновываются два возможных подхода к моделированию спектров SphinX: для мелкомасштабных безвспышечных активных областей спектры SphinX моделируются в изотермическом приближении, в то время как для микровспышек применяется двухтемпературная модель.

В следующем разделе приводятся результаты, полученные в ходе сравнения характеристик поля и излучения микровспышек (активных областей). Наиболее типичным видом зависимости оказалась степенная функция. Показатели степени для зависимости потока излучения вспышки в момент максимума (параметр PFF – peak flare flux) от силы магнитного поля и магнитного потока в диапазоне 2.8–36.6 Å существенно ниже, чем в диапазоне 1–8 Å и вблизи линии 8.42 Å. Приведено сопоставление полученных в ходе исследования зависимостей с ранее известными данными для крупных вспышек из работы Су [26] (Рисунок 3).

Проведено обсуждение возможных различий между механизмами нагрева в мелкомасштабных безвспышечных активных областях и микровспышках. Для этого рассмотрена модель RTV (Rosner-Tucker-Vaiana) [27], которая основана на приближении постоянного давления и равномерного нагрева. Основываясь на результатах ряда работ [28–30], в рамках модели RTV можно выразить зависимость давления *p* от силы магнитного поля *B* следующим образом:

$$p \propto B^{6\alpha/7},$$
 (3)

где α коэффициент, который зависит от механизма нагрева (например, для сценария нагрева за счет нановспышек $\alpha = 2$, а для нагрева альвеновскими волнами $\alpha = 1$ [29,30]. Для давления и силы магнитного поля, рассчитанных по экспериментальным данным для исследуемых объектов, значение коэффициента α в формуле 3 составило 0.85 ± 0.47 для активных областей и 1.79 ± 0.93 для микровспышек. На основе полученных результатов сделан вывод о возможном отличии механизмов нагрева для двух исследованных групп объектов: для активных областей наиболее вероятен нагрев за счет альвеновских волн, а для микровспышек – за счет магнитного пересоединения.

Пятая глава

В пятой главе представлены результаты статистического исследования зависимости основных физических параметров плазмы от рентгеновского балла события для микровспышек различных рентгеновских классов [A5]. В первом подразделе приводится описание данных и методов обработки, в частности, показано как выполняется двухтемпературная и изотермическая аппроксимация спектров SphinX и как вычисляются значения температуры и меры эмиссии для микровспышек. Также



Рис. 4: Поток МР излучения в диапазоне 1–8 Å как функция температуры плазмы и меры эмиссии. Верхняя панель соответствует изотермической модели, а нижняя - двухтемпературной модели. Красные условные обозначения на графике соответствуют данным настоящего исследования: красными квадратами отмечены экспериментальные точки, а красная штриховая линия - соответствующий результат фитирования. Черные обозначения - данные Фелдмана и др. [31]. Синие двумерные гистограммы соответствуют данным Райана и др. [32].

описан метод расчета объема горячей плазмы по данным прибора MISH. Значение объема необходимо для определения концентрации плазмы и тепловой энергии микровспышек.

Представлены результаты диагностики плазмы в рамках одно- и двухтемпературной моделей для более чем 450 микровспышек. Эти данные сравниваются с результатами предыдущих работ для более мощных событий (Рисунок 4). На основании сравнения делается о вывод о существенно более высоких фактических температурах плазмы в микровспышках, чем значения, которые можно получить экстраполяцией дан-



Рис. 5: Поток MP излучения микровспышек как функция соотношения температур вспышечной и окружающей плазмы в логарифмическом масштабе

ных из других работ в область событий малой интенсивности. Сделан вывод о невозможности описания зависимости температуры от рентгеновского класса на всем динамическом диапазоне вспышек (от микродо макрособытий) одной показательной функцией.

Далее в работе рассмотрен вопрос о минимальном рентгеновском классе вспышки, способной нагревать плазму до температуры, превышающей температуру окружающей плазмы. Для этого изучена зависимость отношения температур горячей и холодной компонент плазмы от пикового потока мягкого рентгеновского излучения (Рисунок 5). Полученная зависимость была экстраполирована в сторону значения, равного единице, и определено, что температуры обеих компонент сравниваются при рентгеновском классе событий A0.0002.

В последнем разделе выполнен анализ зависимости тепловой энергии микровспышки от рентгеновского класса события в рамках модели RTV. В модели используется предположение о постоянном давлении и однородном нагреве, что должно довольно хорошо реализовываться в малых горячих петлях микровспышек. Еще одно предположение в рамках модели RTV заключается в стационарном условии энергетического баланса. В соответствии с законами масштабирования RTV [21] $n_e \sim l^3$, $T_e \sim l^2$, $E_{\rm th} \sim l^{7.5}$, где l длина петли. Принимая во внимание все перечисленные уравнения, и считая $V \sim l^3$, можно получить:

$$EM = n_e^2 V \backsim T_e^{4.5},\tag{4}$$

$$E_{\rm th} \sim T_e^{3.75},\tag{5}$$

С другой стороны, на основании полученных соотношений для двухтемпературной модели можно получить $EM \sim T_e^{4.38\pm0.88}$ и $E_{\rm th} \sim T_e^{3.95\pm0.79}$. Сделан вывод о хорошем согласии с отношениями, предполагаемыми законами масштабирования RTV, что является аргументом в пользу возможности применения модели в отношении солнечных микровспышек.

В Заключении диссертации приведены следующие основные результаты работы:

- Впервые в короне Солнца обнаружена высокотемпературная плазма с Т > 4МК в микровспышках рентгеновского класса А и ниже. Результат получен на основе данных спектрогелиометра MISH, работавшего в линии MgXII (8.419 Åи 8.425 Å) на борту российского спутника КОРОНАС-Фотон. Обработка данных произведена оригинальным методом, разработанным в ходе диссертационного исследования.
- 2. Впервые обнаружены микровспышки с продолжительным энерговыделением на фазе спада вспышки – аналоги больших вспышек типа LDE. Особенностью вспышек является длительное время жизни горячей плазмы, существенно превышающее время ее охлаждения. Все три обнаруженных события сопровождались эруптивными процессами (KBM). Ранее KBM во вспышках столь низких рентгеновских классов не наблюдались.
- 3. По результатам температурной диагностики более чем 450 микровспышек показано, что зависимость температуры вспышки от ее рентгеновского класса для микровспышек не согласуется с ранее известной зависимостью для обычных и больших вспышек. Предложена новая зависимость на основе степенной функции, которая корректно описывает данные во всем доступном для наблюдения диапазоне – от микровспышек до крупных событий. Для проведения исследования разработан собственный метод калибровки данных прибора SphinX.
- В приближении двухтемпературной модели вспышки получена оценка минимального класса, при котором температура плазмы вспышки превышает температуру окружающей плазмы. Граница соответствует рентгеновскому классу A0.0002.
- 5. Получены эмпирические зависимости между потоком мягкого рентгеновского излучения микровспышки и характеристиками фотосферного магнитного поля в этой области. Помимо вспышек, зависимость подтверждена также для малоразмерных активных об-

ластей. Показано, что в приближении RTV (Rosner-Tucker-Vaiana) полученные зависимости свидетельствуют о механизме нагрева за счет альвеновских волн для активных областей и механизме нагрева за счет магнитного пересоединения для микровспышек.

В заключении также обсуждаются возможные направления продолжения исследований и использование полученных результатов работы при планировании будущих космических экспериментов. Так, например, рекомендуется включать в состав аппаратуры, работающей в условиях минимума солнечной активности, высокочувствительные приборы с хорошим временным разрешением для наблюдения высокотемпературной плазмы. С точки зрения развития проведённых исследований интересным представляется направление по изучению эруптивных процессов в микровспышках как составляющей транзиентного солнечного ветра. Перспективным также может быть продолжение работы по поиску корреляции между параметрами магнитного поля и мощностью регистрируемых в соответствующих областях микровспышек. Использование данных современных приборов, строящих векторные магнитограммы Солнца с высоким разрешением, позволит проводить оценки возможной непотенциальной части магнитного поля, что существенно повысит точность анализа.

Публикации автора по теме диссертации

- В рецензируемом журнале, индексируемом РИНЦ:
- А1 С.А. Богачёв, А. С. Кириченко. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная – 2013. – № 5. – С. 3-15. (Impact Factor=0.116)
 - В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и Scopus:
- A2 S. A. Bogachev, A. S. Kirichenko. Solar space research by imaging X-ray spectroscopy // Herald of the Russian Academy of Sciences – 2014. – № 84. – PP. 80-84. doi: 10.1134/S1019331614020014. (Impact Factor=0.428).
- АЗ А. С. Кириченко, С. А. Богачёв. Длительный нагрев плазмы в солнечных микровспышках рентгеновского класса А1.0 и ниже // Письма в Астрономический Журнал – 2013. – Т.39, № 11. – С. 884-896. doi: 10.7868/s0320010813110041. (Impact Factor=1.297).
- A4 Kirichenko, A. S., Bogachev, S. A. The Relation Between Magnetic Fields and X-ray Emission for Solar Microflares and Active Regions // Solar Physics. - 2017 - V. 292, Issue 9. - PP. 15. doi: 10.1007/s11207-017-1146-8. (Impact Factor=2.580).

A5 Kirichenko, A. S., Bogachev, S. A. Plasma Heating in Solar Microflares: Statistics and Analysis // The Astrophysical Journal. - 2017. - V. 840, Issue 1-PP. 8. doi: 10.3847/1538-4357/aa6c2b. (Impact Factor=5.551).

Список литературы

- S. Tsuneta, S. Masuda, T. Kosugi, and J. Sato. Hot and Superhot Plasmas above an Impulsive Flare Loop. Astrophys. J., 478:787, March 1997.
- [2] F. Reale, P. Testa, J. A. Klimchuk, and S. Parenti. Evidence of Widespread Hot Plasma in a Nonflaring Coronal Active Region from Hinode/X-Ray Telescope. Astrophys. J., 698:756-765, June 2009.
- [3] A. Caspi. Super-hot (T > 30 MK) thermal plasma in solar flares. PhD thesis, Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720-7450, USA, May 2010.
- [4] M. J. West, S. J. Bradshaw, and P. J. Cargill. On the Lifetime of Hot Coronal Plasmas Arising from Nanoflares. *Solar Phys.*, 252:89–100, October 2008.
- [5] Y.-K. Ko, G. A. Doschek, H. P. Warren, and P. R. Yount. Ultra-Hot Plasma in Active Regions Observed by the Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer on Hinode. In B. Lites, M. Cheung, T. Magara, J. Mariska, and K. Reeves, editors, *The Second Hinode Science Meeting:* Beyond Discovery-Toward Understanding, volume 415 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, page 275, December 2009.
- [6] D. V. Reames. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. Space Sci. Rev., 90:413-491, October 1999.
- [7] F. C. Jones and D. C. Ellison. The plasma physics of shock acceleration. Space Sci. Rev., 58:259–346, December 1991.
- [8] S. Masuda, T. Kosugi, H. Hara, S. Tsuneta, and Y. Ogawara. A looptop hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection. *Nature*, 371:495–497, October 1994.
- [9] S. W. Kahler. Solar flares and coronal mass ejections. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 30:113-141, 1992.
- [10] S. K. Antiochos, C. R. DeVore, and J. A. Klimchuk. A Model for Solar Coronal Mass Ejections. Astrophys. J., 510:485-493, January 1999.

- [11] H. V. Cane, I. G. Richardson, and O. C. St. Cyr. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.*, 27:3591–3594, 2000.
- [12] J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb, N. Gopalswamy, E. Huttunen, J. C. Kasper, N. V. Nitta, W. Poomvises, B. J. Thompson, C.-C. Wu, S. Yashiro, and A. N. Zhukov. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms (Dst <= -100 nT) during 1996-2005. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 112:10102, October 2007.
- [13] W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, and A. L. Clúa de Gonzalez. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.*, 88:529– 562, April 1999.
- [14] I. G. Hannah, H. S. Hudson, M. Battaglia, S. Christe, J. Kašparová, S. Krucker, M. R. Kundu, and A. Veronig. Microflares and the Statistics of X-ray Flares. *Space Sci. Rev.*, 159:263–300, September 2011.
- [15] R. O. Milligan. A Hot Microflare Observed with RHESSI and Hinode. Astrophys. J. Lett., 680:L157–L160, June 2008.
- [16] J. W. Brosius and G. D. Holman. Observations of the Thermal and Dynamic Evolution of a Solar Microflare. Astrophys. J., 692:492–501, February 2009.
- [17] F. Chen and M. D. Ding. Evidence of Explosive Evaporation in a Microflare Observed by Hinode/EIS. Astrophys. J., 724:640–648, November 2010.
- [18] T. Shimizu. Energetics and Occurrence Rate of Active-Region Transient Brightenings and Implications for the Heating of the Active-Region Corona. Pub. Astron. Soc. Japan, 47:251–263, April 1995.
- [19] T. Watanabe, H. Hara, T. Shimizu, E. Hiei, R. D. Bentley, J. Lang, K. J. H. Phillips, C. D. Pike, A. Fludra, and B. J. I. Bromage. Temperature structure of active regions deduced from helium-like sulphur lines. *Solar Phys.*, 157:169–184, March 1995.
- [20] S. Yashiro, S. Akiyama, N. Gopalswamy, and R. A. Howard. Different Power-Law Indices in the Frequency Distributions of Flares with and without Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J. Lett.*, 650:L143–L146, October 2006.
- [21] M. J. Aschwanden. Physics of the Solar Corona. An Introduction. Praxis Publishing Ltd, August 2004.

- [22] E. N. Parker. Nanoflares and the solar X-ray corona. Astrophys. J., 330:474–479, July 1988.
- [23] K. P. Dere, E. Landi, H. E. Mason, B. C. Monsignori Fossi, and P. R. Young. CHIANTI - an atomic database for emission lines. Astron. Astrophys. Suppl., 125, October 1997.
- [24] S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, S. V. Shestov, S. A. Bogachev, O. I. Bugaenko, A. P. Ignat'ev, A. A. Pertsov, A. S. Ulyanov, A. A. Reva, V. A. Slemzin, N. K. Sukhodrev, Y. S. Ivanov, L. A. Goncharov, A. V. Mitrofanov, S. G. Popov, T. A. Shergina, V. A. Solov'ev, S. N. Oparin, and A. M. Zykov. The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft. *Solar System Research*, 45:162–173, April 2011.
- [25] S. Gburek, J. Sylwester, M. Kowalinski, J. Bakala, Z. Kordylewski, P. Podgorski, S. Plocieniak, M. Siarkowski, B. Sylwester, W. Trzebinski, S. V. Kuzin, A. A. Pertsov, Y. D. Kotov, F. Farnik, F. Reale, and K. J. H. Phillips. SphinX: The Solar Photometer in X-Rays. *Solar Phys.*, 283:631–649, April 2013.
- [26] Y. Su, A. Van Ballegooijen, J. McCaughey, E. Deluca, K. K. Reeves, and L. Golub. What Determines the Intensity of Solar Flare/CME Events? Astrophys. J., 665:1448–1459, August 2007.
- [27] R. Rosner, W. H. Tucker, and G. S. Vaiana. Dynamics of the quiescent solar corona. Astrophys. J., 220:643–645, March 1978.
- [28] S. Yashiro and K. Shibata. Relation between Thermal and Magnetic Properties of Active Regions as a Probe of Coronal Heating Mechanisms. *Astrophys. J. Lett.*, 550:L113–L116, March 2001.
- [29] K. Galsgaard and A. Nordlund. Heating and activity of the solar corona
 1. Boundary shearing of an initially homogeneous magnetic field. J. Geophys. Res., 101:13445–13460, June 1996.
- [30] G. H. Fisher, D. W. Longcope, T. R. Metcalf, and A. A. Pevtsov. Coronal Heating in Active Regions as a Function of Global Magnetic Variables. Astrophys. J., 508:885–898, December 1998.
- [31] U. Feldman, G. A. Doschek, W. E. Behring, and K. J. H. Phillips. Electron Temperature, Emission Measure, and X-Ray Flux in A2 to X2 X-Ray Class Solar Flares. Astrophys. J., 460:1034, April 1996.
- [32] D. F. Ryan, R. O. Milligan, P. T. Gallagher, B. R. Dennis, A. K. Tolbert, R. A. Schwartz, and C. A. Young. The Thermal Properties of Solar Flares over Three Solar Cycles Using GOES X-Ray Observations. Astrophys. J. Supp, 202:11, October 2012.