

На правах рукописи

Шарыкин Иван Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО
МНОГОВОЛНОВЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗРЕШЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ**

01.03.03 – Физика Солнца

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук Струминский Алексей Борисович

Официальные оппоненты:

Богачев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Степанов Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, Член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ)

Защита состоится 24 ноября 2015 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан 1 октября 2015 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Т.М. Буринская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Солнечная вспышка представляет собой комплекс различных физических явлений в плазме, объединенных в один взаимосвязанный процесс накопления и выделения энергии. Локализация области первичного энерговыделения и определение его триггера является центральной проблемой физики солнечных вспышек. Эта проблема непосредственно связана с предсказанием и прогнозом солнечной активности, что очень важно для навигации, связи и освоения космического пространства человеком. Исследование солнечных вспышек требует анализа наблюдений в различных диапазонах электромагнитного спектра, а также самосогласованного теоретического моделирования.

Главным источником информации о процессах, происходящих во время солнечных вспышек, является электромагнитное излучение. Солнечные вспышки проявляют себя во всех диапазонах электромагнитного (ЭМ) спектра, это дает нам информацию о разных физических процессах. Большая часть электромагнитного излучения (все ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма излучение, а также часть ИК излучения и радиоизлучения) может регистрироваться только из космоса. Поэтому качественный скачок в понимании солнечных вспышек был связан с развитием космических технологий. В настоящее время мы имеем возможность исследовать вспышечное энерговыделение во всех диапазонах электромагнитного спектра. Благодаря наблюдениям космических и наземных обсерваторий многоволновые исследования солнечных вспышек сегодня являются передним краем развития солнечной физики.

Существует множество моделей вспышек (например, описанных в книге [Aschwanden, 2005]), в которых первоначальное энерговыделение происходит в корональных токовых слоях при различной геометрии магнитного поля. Наиболее популярной и обсуждаемой моделью является модель эруптивной двухленточной солнечной вспышки [Hirayama, 1974, Magara et al., 1996; Tsuneta, 1997] (далее называем ее стандартной моделью эруптивной солнечной вспышки). В рамках стандартной модели предполагается существование магнитного жгута, вытянутого вдоль линии инверсии полярности магнитного поля, который теряет устойчивость и начинает подниматься во внешнюю корону и затем в виде облака плазмы с магнитным полем улетает в межпланетное пространство (корональный выброс массы - КВМ). Под эруптирующим магнитным жгутом происходит формирование вытянутого квазивертикального токового слоя, где происходит магнитное пересоединение и ускорение заряженных частиц (первоначальное вспышечное энерговыделение). Ускоренные электроны достигают плотных слоев солнечной атмосферы и нагревают плазму, которая затем расширяется (хромосферное испарение) и заполняет магнитные петли (см. [Sadykov et al., 2015]). В стандартной модели рост потоков ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения связан только с процессом хромосферного испарения. Наблюдения первоначального вспышечного энерговыделения, локализованного в короне затруднены из-за малой меры эмиссии (малой плотности) корональной плазмы, поэтому сегодня мы мало знаем

о процессах нагрева плазмы и одновременного ускорения заряженных частиц в области первоначального энерговыделения.

В рамках газодинамических моделей хромосферного испарения, инициируемого пучком ускоренных электронов со степенным энергетическим спектром, нагрев плазмы, как правило, ограничивается температурой ~ 30 МК [Костюк и Пикельнер, 1974; MacNeice et al., 1984; Fisher et al., 1985; Kosovichev, 1986; Mariska et al., 1989; Бойко и Лифшиц, 1995]. Однако в недавних исследованиях [Caspi, 2010; Caspi et al., 2014] было показано, что в некоторых вспышках наблюдается сверхгорячая вспышечная плазма, с характерной температурой >30 МК. Скорее всего, сверхгорячая плазма связана именно с первоначальным энерговыделением [Caspi, 2010], поэтому ее исследование представляет особый интерес для понимания процесса начального нагрева плазмы и ускорения заряженных частиц в корональных токовых слоях. До сих пор неизвестно, как соотносятся между собой энергетика тепловой и нетепловой компонент в области сверхгорячей плазмы, а также является ли сверхгорячая плазма источником ускоренных электронов. Наблюдения КА *Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)* [Lin et al., 2002], который является на сегодня лучшим инструментом в своем классе, позволяют одновременно исследовать нагрев плазмы до сверхгорячих температур и динамику ускоренных электронов.

При исследовании энерговыделения солнечных вспышек необходимо иметь представление о тонкой структуре вспышечной области, так как многие каналы энерговыделения зависят от геометрических параметров магнитных петель, вдоль которых происходит перенос энергии. Тонкая структура может влиять на плотность ускоренных электронов в пучке [Krucker et al., 2011] и их распространение в плазме. Кроме этого плотность электрического тока, текущего вдоль магнитных силовых линий, также зависит от поперечных размеров токовых трубок. Однако для описания вспышечного процесса обычно используется модель вспышечной области без учета тонкой пространственной структуры.

Пространственное разрешение лучших рентгеновских изображений Солнца, сделанных КА *RHESSI*, не превышает нескольких угловых секунд. Это не позволяет определить пространственную структуру вспышечного энерговыделения, которое может развиваться на меньших масштабах, чем характерные размеры рентгеновских источников. Однако наблюдения Солнца в ультрафиолетовом и оптическом диапазоне электромагнитного спектра дают возможность исследования тонкой пространственной структуры вспышечной области на масштабах менее 1 угловой секунды. На сегодняшний день, рекордным пространственным разрешением ~ 0.1 угловых секунд в оптическом диапазоне обладает телескоп *New Solar Telescope (NST)* [Goode et al., 2010] обсерватории *Big Bear Solar Observatory (BBSO)*.

В рамках стандартной модели нагрев плазмы во всей вспышечной области осуществляется за счет кулоновского взаимодействия плазмы с ускоренными заряженными частицами. Одним из дополнительных источников нагрева вспышечной плазмы может являться диссипация электрических токов [Janvier et al., 2014; Musset et al., 2015; Zaitsev & Stepanov, 2015], генерируемых в активной области, которая игнорируется в стандартной модели. Непонятно насколько большой вклад вносит диссипация электрических токов в общий энергетический баланс солнечных вспышек, и как область усиленных электрических токов соотносятся с источниками излучения в различных диапазонах электромагнитного спектра. Если энерговыделение реализуется в плотных слоях солнечной атмосферы, где плазма находится в частично ионизованном состоянии, то диссипация электрических токов может вносить существенный вклад в общий энергетический баланс за счет меньшей электрической проводимости. Физика плазменных процессов в условиях частичной ионизации является слабо изученной применительно к солнечным вспышкам, и поэтому представляет особый интерес для исследователей.

Величину электрических токов можно оценивать по измерениям полного вектора магнитного поля (с помощью закона Ампера). На сегодняшний день,

спектрополяриметрические наблюдения отдельных магниточувствительных линий поглощения в диапазоне видимого и ближнего инфракрасного излучения позволяет оценивать полный вектор магнитного поля на уровне фотосферы и хромосферы, основываясь на эффекте Зеемана. Такие измерения реализованы на наземных и космических телескопах. Например, систематические фотосферные наблюдения вектора магнитного поля прибором Helioseismic Magnetic Imager (HMI) [Scherrer et al., 2012] на борту КА Solar Dynamics Observatory (SDO) [Pesnell et al., 2012] позволяют детально исследовать временную динамику магнитного поля и электрических токов, а также восстанавливать пространственную структуру электрических токов в солнечных вспышках.

Цели и задачи

Основные задачи диссертационной работы разделяются на три группы:

1. Исследование сверхгорячей плазмы в солнечных вспышках с точки зрения энергетического баланса во вспышечной области для определения связи термодинамических параметров сверхгорячей плазмы с динамическими характеристиками спектра ускоренных электронов.
2. Исследование пространственной тонкой структуры вспышечной области для оценки потоков ускоренных электронов и плотности электрических токов, текущих во вспышечной области.
3. Исследование динамики и распределения электрических токов во вспышечной области с целью определения роли электрических токов во вспышечном энерговыделении.

Научная новизна

В диссертационной работе используются самые современные данные наблюдений солнечных вспышек с лучшим пространственным разрешением в радио, оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Это позволило впервые исследовать:

1. связь между динамикой спектра ускоренных электронов и термодинамическими параметрами сверхгорячей плазмы по результатам анализа рентгеновских спектров RHESSI.
2. тонкую пространственную структуру вспышечных лент на основе уникальных оптических наблюдений 1.6 м телескопа NST/BBSO и ее влияние на поток ускоренных электронов и плотность электрических токов.
3. гелиосейсмическое возмущение в слабой вспышке С класса и роль электрических токов в генерации этого возмущения по результатам анализа наблюдений HMI/SDO.

Научная и практическая ценность

Проведенные исследования важны для понимания фундаментальной природы солнечных вспышек, являющихся одним из основных факторов, влияющих на космическую погоду. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в исследовательской работе таких научных организаций как: ИЗМИРАН, ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, ГАИШ МГУ, ФИАН, Институте прикладной геофизике (ИПГ).

Методы исследования

В Диссертационной работе анализируются данные пространственно-разрешенных наблюдений солнечных вспышек, сделанных в различных диапазонах электромагнитного спектра. Для решения поставленных задач происходит отбор событий, которые анализируются с помощью пакета программ Solar Soft, а также собственных программ автора, написанных на языке IDL.

Динамика заряженных частиц анализируется по данным наблюдений нетеплового рентгеновского излучения, полученных с помощью космических обсерваторий RHESSI и FERMI. Параметры степенного спектра ускоренных электронов определяется по спектрам нетеплового рентгеновского излучения в рамках модели «толстой мишени» [Brown, 1971; Syrovatskii & Shmeleva, 1972]. Данные NORH и NORP по микроволновому радиоизлучению является дополнительным источником информации об ускоренных электронах [Dulk et al., 1985]. По восстановленным спектрам укоренных электронов рассчитывается кинетическая мощность, которая сравнивается с остальными каналами энерговыделения.

Для определения термодинамических параметров плазмы используются данные GOES, а также спектры теплового рентгеновского излучения, полученные с помощью RHESSI. По рассчитанным значениям температуры и меры эмиссии плазмы оценивается внутренняя энергия, потери тепла за счет излучения и теплопроводности.

Ультрафиолетовые изображения AIA/SDO [Lemen et al., 2012] и EIT/SOHO используются для более детального исследования пространственной структуры вспышечной области и определения ее геометрических параметров. Ультрафиолетовые изображения сравниваются с источниками как теплового, так и нетеплового рентгеновского излучения, а также с картами магнитного поля, полученными прибором HMI/SDO.

Для анализа тонкой пространственной структуры вспышечной области используются наблюдательные данные оптического 1.6 м телескопа NST обсерватории BBSO.

Для определения структуры магнитного поля во вспышечной области и оценки электрических токов и полей на уровне фотосферы используются магнитограммы HMI/SDO. Доплерограммы HMI/SDO используются для анализа динамики течений плазмы по лучу зрения в фотосфере. С помощью доплерограмм определяется место генерации гелиосейсмического возмущения солнечной вспышки и направление его движения.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. The 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, India (2012)
2. VII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва (2013)
3. IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва (2013)
4. American Astronomical Society Meeting 224, Boston, USA (2014)
5. The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia (2014)
6. American Geophysical Union Meeting, San-Francisco, USA (2014)
7. XVIII всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015», Санкт-Петербург (2014)
8. X ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва (2015)
9. XII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва (2015)

Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах в ИКИ РАН, КРАО, Big Bear Solar Observatory, Stanford University, NASA Ames Research Center, Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Science.

Личный вклад автора

Научные исследования, которые легли в основу диссертационной работы, были выполнены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, поиске и отборе солнечных вспышек для детального анализа, интерпретации наблюдательных результатов. Обработка наблюдательных данных была полностью проведена лично автором.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, описания инструментов, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, 27 рисунков и одна таблица. Список литературы включает в себя 121 наименование.

Основное содержание работы

Введение диссертационной работы описывает исследуемую проблему, в рамках которой, ставятся задачи диссертационной работы. Приводится обзор научной литературы, а также обсуждается актуальность, новизна и теоретическая значимость исследований.

Материал первых двух глав посвящен решению первой задачи, связанной с исследованием сверхгорячей плазмы. Тонкая пространственная структура вспышечной области (вторая задача) рассматривается в третьей главе. В третьей и четвертых главах представлены результаты исследования электрических токов на уровне солнечной фотосферы и их связь со вспышечным процессом (третья задача). В начале, каждой из глав приводится краткий обзор литературы, а также формулируются ее цели и задачи. В конце глав приводится список ее основных результатов.

Глава 1 описывает исследования сверхгорячей плазмы в мощной солнечной вспышке 9 августа 2011 г. GOES класса X6.9. Материал данной главы основывается на работе [Шарыкин и др., 2015]. Во введении к главе приводятся доводы в пользу выбора исследуемого события. Уникальность выбранного события заключается в большой температуре плазмы, которая оценивается по данным GOES в 32.5 МК. Такое значение температуры позволяет отнести данное событие к сверхгорячим вспышкам [Caspi & Lin, 2010] и, более того, оно является самым горячим событием среди M и X вспышек по данным GOES с 2000 по 2012 гг. Приводится сравнение вспышек 23 июля 2002 г. (сверхгорячая плазма данной вспышки исследовалось в работе [Caspi & Lin, 2010]) и 9 августа 2011 г. по данным GOES.

Событие 9 августа 2011 г. по данным GOES горячее на 10 МК, чем событие 23 июля 2002 г. При таком различии в температурах можно предположить, что сверхгорячая плазма или низкоэнергичные (<20 кэВ) нетепловые электроны во вспышке 9 августа 2011 г. вносят более существенный вклад в поток рентгеновского излучения в коротковолновом канале GOES по сравнению со вспышкой 23 июля 2002 г. Однако наличие высоких температур вспышечной плазмы может быть достоверно установлено только с помощью детального анализа рентгеновских спектров (например, высокая температура может быть связана с нетепловым излучением, которое вносит вклад в коротковолновый канал GOES), получаемых такой обсерватории как RHESSI. Для анализа выбранного события в главе используются

данные наблюдений RHESSI и GOES по рентгеновскому излучению, а также данные наблюдений AIA/SDO и EVE/SDO по ультрафиолетовому излучению.

В разделе 1.2 обсуждаются многоволновые наблюдения солнечной вспышки 9 августа 2011 г. Приводятся временные профили рентгеновского излучения по данным RHESSI и GOES. Также приведены изображения вспышечной области, на которых совмещены контурные рентгеновские изображения RHESSI и ультрафиолетовые изображения AIA/SDO. Анализ вспышечной области выявил, что наблюдавшиеся рентгеновские источники были локализованы в области аркады петель, видимых на ультрафиолетовых изображениях. По изображениям сделаны оценки объема вспышечной области.

В разделе 1.3 описывается спектральный анализ рентгеновского излучения вспышки 9 августа 2011 г. Рентгеновские спектры исследуются в однотемпературном и двухтемпературном приближениях. Это связано с тем, что область спектра в диапазоне 25-50 кэВ имеет характерный вид широкого «колпака» и может быть объяснена как тепловым излучением сверхгорячей плазмы, так и тормозным излучением нетепловых электронов с мягким спектром. Выше 50 кэВ рентгеновский спектр аппроксимируется степенным законом, соответствующим тормозному излучению ускоренных электронов. Двухтемпературная аппроксимация тепловой части рентгеновского спектра позволила четко выявить сверхгорячую плазму с температурой достигающей 45 МК. Результаты спектрального анализа используются далее в разделе 1.5 для расчета тепловой энергии плазмы и нетепловой энергии ускоренных электронов.

Обсуждение причины аномально высокой температуры по GOES для исследуемого события приведено в разделе 1.4. Показано, что высокая температура по GOES объясняется малым потоком рентгеновского излучения в длинноволновом канале рентгеновского детектора GOES, что может быть связано с малым количеством горячей плазмы <20 МК. Тогда как плазма с более высокими температурами формирует сильный поток рентгеновского излучения, наблюдаемого в коротковолновом канале GOES.

Раздел 1.5 посвящен обсуждению результатов расчета энергетики солнечной вспышки. В начале раздела рассматривается упрощенная физическая модель вспышечной области. Предполагается, что в верхней части вспышечной области находится зона (sh-область) со сверхгорячей плазмой, а ниже расположена область (h-область) с горячей плазмой. Данная геометрия подтверждается наблюдением, которое показывает, что рентгеновские источники >15 кэВ расположены выше источников рентгеновского излучения с меньшими энергиями. Наблюдаемая плазма в sh-области предполагается источником ускоренных электронов и формируется в результате первичного энерговыделения. Данное предположение основано на том, что sh-область лежит ближе всего к предполагаемому месту начального энерговыделения в короне. Сформированная популяция нетепловых электронов инжектируется в h-область и далее в плотную солнечную атмосферу, приводя к хромосферному испарению. Наряду с нагревом за счет взаимодействия частиц плазмы с нетепловыми электронами, мы предполагаем наличие теплового потока из sh-области в h-область вспышечных петель, который может приводить к перераспределению энергии между h- и sh- областями. В вершине петли и в ее основании градиент температуры принят равным нулю, поэтому перераспределение тепла происходит только внутри вспышечной петли.

Энергетика солнечной вспышки рассчитывается в рамках однотемпературного и двухтемпературного приближений. Приведены расчеты временной производной внутренней энергии, кинетической мощности ускоренных электронов и радиационных потерь тепла (рассчитанных по данным GOES и EVE). Для расчета объема h- и sh-области предложен метод, основанный на балансе давлений между данными областями. Показано, что энергетический баланс во вспышечной области лучше выполняется в случае двухтемпературного приближения. В частности фаза охлаждения (уменьшение внутренней энергии плазмы) хорошо объясняется радиационными потерями тепла. В фазе нагрева рост

внутренней энергии в несколько раз выше, чем кинетическая мощность ускоренных электронов. В рамках рассматриваемой модели, тепловой поток из sh-области может скомпенсировать данную разницу энергий. Однако оценки показали, что классический тепловой поток из сверхгорячей области в горячую область крайне высок по сравнению с остальными каналами энерговыделения (разница составляет, как минимум на порядок). Скорректировать данный дисбаланс можно рассматривая не классическую теплопроводность, а аномальную (подавленную), связанную с плазменной турбулентностью в сверхгорячей области.

В обсуждении рассматривается роль аномальной теплопроводности во вспышечном энерговыделении. Проводятся аналогии процесса переноса энергии во вспышечной плазме с результатами экспериментального моделирования распространения пучков электронов в замагниченной плазме [Astrelin et al., 1997], где наблюдается явление подавления теплопроводности за счет плазменной турбулентности. Причем турбулентность, которая приводит к подавлению теплопроводности, непосредственно генерируется пучком ускоренных электронов. В современных моделях газодинамических процессов теплопроводность обычно рассматривается классической, однако процесс взаимодействия ускоренных частиц с плазмой и электромагнитными полями в ней может оказывать влияние на процессы переноса и динамику плазмы. В будущем необходимо провести детальные самосогласованные расчеты газодинамики и кинетики ускоренных частиц во вспышечной области.

Глава 2 также посвящена исследованию сверхгорячей плазмы в простой, не эруптивной однопетлевой вспышке C1.4 GOES класса, произошедшая 12 августа 2002 г. Материал главы основывается на работе [Sharykin et al., 2014a]. Для анализа используются данные RHESSI и GOES по рентгеновскому излучению, данные NORP и NORH по микроволновому радиоизлучению и ультрафиолетовые изображения EIT/SOHO.

В предыдущей главе исследовалась мощная эруптивная солнечная вспышка. Однако интерпретация наблюдений таких событий затруднена, так как вспышечный процесс характеризуется сложной временной динамикой и сложной геометрией магнитного поля. Для лучшего понимания первоначального энерговыделения и ускорения электронов необходимо произвести более детальное количественное исследование процесса ускорения электронов и динамики сверхгорячей плазмы в событии с более простой пространственной (петлевой) структурой и временной динамикой (уединенный всплеск) ускоренных электронов. Была выбрана вспышка C1.4 12 августа 2002 г. с единичным всплеском нетеплового рентгеновского излучения (>50 кэВ). Спектральный анализ спектров RHESSI для данного события также выявил наличие сверхгорячей плазмы ($T > 30$ МК). Таким образом, сверхгорячая плазма формируется не только в событиях высокой мощности (как в случае вспышки, описываемой в главе 1), но также проявляется и в слабых C вспышках.

В разделе 2.2 приводятся временные профили рентгеновского излучения по данным наблюдений RHESSI и GOES, временные профили микроволнового радиоизлучения по данным NORP. Представлены ультрафиолетовые изображения EIT/SOHO (195 Å) и микроволновые радиоизображения NORH (17 и 34 ГГц), совмещенные с рентгеновскими изображениями RHESSI в разных энергетических каналах. Показано, что источник рентгеновского излучения имеет петлеобразную геометрию, причем его размеры практически не меняются (полагаем $V = \text{const}$) в процессе развития вспышечного процесса. В разделе приведены результаты анализа спектров RHESSI. Спектры аппроксимируются тепловой однотемпературной моделью и одностепенной функцией, описывающей нетепловую часть рентгеновского спектра. Показано, что величина меры эмиссии, полученной из спектров RHESSI, как минимум на порядок меньше оценок по данным GOES, а температура по RHESSI как минимум выше на 70% чем по GOES. Данные наблюдения указывают на то, что RHESSI и

GOES регистрируют излучения от плазмы, находящейся в разных физических условиях: RHESSI регистрирует излучение от разряженной сверхгорячей плазмы (температура достигает величин 40-50 МК), а GOES от плотной «обычной» горячей плазмы (температура не превышает 15 МК).

Анализ нетепловой компоненты рентгеновского спектра выявил, что максимальный поток ускоренных электронов достигает максимума на спаде температуры сверхгорячей плазмы. Причем степенной спектральный индекс практически не меняет своего значения ($\gamma \approx 4$). Степенной спектральный индекс микроволнового радиоизлучения по данным NORP, рассчитанный между частотами 17 и 35 ГГц также стабилен во времени и примерно равен 1.5. Постоянство во времени степенного индекса спектра ускоренных электронов свидетельствует о постоянстве свойств ускорителя (в частности, постоянство уровня турбулентности [Liu & Fletcher, 2009]).

Раздел 2.3 посвящен обсуждению результатов расчета энергетики исследуемой солнечной вспышки. Приводится сравнение временной производной внутренней энергии горячей и сверхгорячей плазмы, кинетической мощности ускоренных электронов и радиационных потерь тепла. Появление нетепловой компоненты связано с подавлением роста внутренней энергии сверхгорячей плазмы. Данный результат поддерживает модель стохастического ускорения [Petrosian & Liu, 2004; Liu et al., 2009], в которой электроны ускоряются из высокоэнергетической части распределения Максвелла. Ускорение могло привести к эффективному охлаждению фоновой сверхгорячей плазмы, что прослеживается по динамике температуры в импульсной фазе. Данное охлаждение объясняется эффективным транспортом высокоэнергетичных ускоренных частиц вдоль петли в плотные слои солнечной атмосферы.

Температура, оцененная по данным GOES, возрастает монотонно в фазе роста и не подвержена сильным изменениям во время начала ускорения электронов, что указывает на то, что динамика ускоренных электронов связана именно со сверхгорячей плазмой, которая излучает мягкое рентгеновское излучение, регистрируемое RHESSI. Мягкое рентгеновское излучение горячей плазмы регистрируется GOES и, скорее всего, образуется за счет хромосферного испарения, генерируемого проникающими ускоренными электронами в плотные слои солнечной атмосферы. Также оценки показывают, что классическая теплопроводность приводит к сильно завышенным значениям потоков тепла из сверхгорячей области в горячую. Необходимо рассматривать аномально малую (подавленную) теплопроводность для объяснения энергетического баланса.

Во второй части раздела 2.3 приводятся результаты согласования термодинамических параметров сверхгорячей плазмы с параметрами степенного спектра ускоренных электронов на основе простой количественной модели. Предполагается, что популяция ускоренных электронов формируется из популяции тепловых электронов сверхгорячей плазмы. Причем тепловые электроны ускоряются выше определенного значения переходной энергии, которое определяется балансом между эффективностью ускорения и эффективностью кулоновского трения.

Удалось показать, что динамика нормировочного коэффициента степенного спектра (с постоянным индексом) ускоренных электронов согласуется с динамикой термодинамических параметров тепловых электронов сверхгорячей плазмы. Иными словами популяция ускоренных электронов формируется из популяции тепловых электронов сверхгорячей плазмы. Однако расчеты с учетом кулоновских столкновений показывают, что необходим дополнительный источник диссипации энергии ускоренных электронов в низкоэнергетической части спектра. В качестве такой диссипации может служить электрическое поле обратного тока, который компенсирует наведенное магнитное поле пучка ускоренных электронов. В фазе спада нетеплового рентгеновского излучения, ускорение электронов подавляется из-за возросшей плотности плазмы в петле, чей приток связан с

хромосферным испарением. Высокая плотность плазмы приводит к уменьшению времени термализации нетепловых электронов и их эффективному торможению. Объем, занимаемый сверхгорячей плазмой, уменьшается во время фазы спада.

В итоге, исследование динамики нетепловой и тепловой компонент спектра рентгеновского излучения позволило установить, что популяция ускоренных электронов со степенным спектром может формироваться из популяции электронов тепловой сверхгорячей плазмы. Таким образом, исследование динамики сверхгорячей плазмы позволяет судить о процессе первоначального энерговыделения и сопутствующем ему ускорении электронов. При этом динамика низкотемпературной плазмы, в большей степени, связана с процессом хромосферного испарения.

Глава 3 посвящена исследованию тонкой структуры вспышечных лент с помощью оптического телескопа NST/BBSO с апертурой 1.6 м, обладающим высоким пространственным разрешением (~ 70 км для $H\alpha$). Данный телескоп позволяет получать уникальные по своей детальности изображения солнечной фотосферы и хромосферы в инфракрасном и видимом диапазоне ЭМ спектра. Кроме этого, используются данные наблюдений магнитного поля, выполненных прибором HMI/SDO и ультрафиолетовые изображения, полученные прибором AIA/SDO, для исследования пространственной структуры вспышечной области. Для определения параметров ускоренных частиц и вспышечной плазмы используются данные прибора GBM/FERMI, а также данные рентгеновских детекторов GOES. Описываемые исследования главы основываются на работе [Sharykin & Kosovichev, 2014].

Для анализа выбрана солнечная вспышка C2.1 GOES класса, произошедшая 15 августа 2013 г. приблизительно в 16:45:00 UT. Во время данной вспышки наблюдались крупномасштабные ленты, которые и являются объектом исследования. Событие было также выбрано в силу малых потоков $H\alpha$ излучения, что не приводит к пересыщению ПЗС матрицы регистрирующей камеры прибора VIS. В главе проводится анализ тонкой структуры вспышечных лент, наблюдаемых в оптическом диапазоне ЭМ спектра, и ее влияние на вспышечное энерговыделение. С учетом тонкой пространственной структуры вспышечной области оценивается плотность электрических токов по векторным магнитограммам HMI/SDO, и плотность потока ускоренных электронов, полученных по данным наблюдений рентгеновского излучения, выполненных прибором GBM/FERMI.

В разделе 3.2 приводится общее описание выбранной солнечной вспышки. Показаны временные профили рентгеновского излучения по данным рентгеновских детекторов GOES и прибора Gamma Burst Monitor на КА FERMI. По данным GBM максимальная энергия рентгеновского излучения не превосходила 50 кэВ.

Раздел 3.3 посвящен обсуждению $H\alpha$ изображений VIS/NST. На фильтрограммы, сделанные на длинах волн 6563 ± 0.8 Å (красное и синие крылья линии) выявили тонкую структуру вспышечной ленты в тени пятна. Многочисленные малые уярчения с размером ~ 100 км организованы в виде длинной ~ 10000 км (похожей на цепочку) структуры. Вторая вспышечная лента, расположенная в области более слабого магнитного поля, также показывает мелкомасштабную структуру. Яркость лент выше в красном крыле $H\alpha$ линии нежели в синем, что может свидетельствовать о нисходящих течениях плазмы. На фильтрограммы, сделанные в центре линии (6563 Å) показывают возросшее излучение задолго до появления жесткого рентгеновского излучения, что свидетельствует об эффективном нагреве плазмы во вспышечной области без участия высокоэнергичных ускоренных заряженных частиц.

В разделе 3.4 представлен расчет электрических токов на основе векторных магнитограмм HMI/SDO (временное разрешение 720 с). Компонента электрического тока, нормального к солнечной поверхности, оценивается с помощью закона Ампера. По

изменению магнитного потока в активной области оценивается с помощью закона Фарадея компонента электрического поля в картинной плоскости. На картах распределения вертикального электрического тока показано, что вспышечные ленты коррелируют с областями сильного электрического тока. Кроме этого временная динамика усредненного вертикального электрического тока и горизонтального электрического поля коррелирует со вспышкой.

В обсуждении рассматривается природа формирования тонких вспышечных лент и влияния мелкомасштабной структуры на вспышечной энергосвободы. На основе проведенных оценок показана возможность нагрева плазмы в области ярких узлов за счет диссипации электрических токов в плазме с пониженной проводимостью (по сравнению с ее классическим значением). С помощью оценок показано, что тонкие $H\alpha$ ленты, состоящие из множества мелких узлов с характерным размером 100 км, могут образовываться за счет тиринг неустойчивости токового слоя, формирующегося на сепараторном слое, разделяющим топологически несвязанные между собой магнитные трубки. Кроме этого обсуждается влияние тонкой структуры на распространение ускоренных электронов. С помощью оценок показано, что в случае распространения ускоренных электронов в тонких магнитных трубках обратный электрический ток может запирает низкоэнергичные (<20 кэВ) электроны.

Глава 4 посвящена исследованию энергосвободы гелиосейсмически активной C7.0 вспышки, произошедшей 17 февраля 2013 г. Выбранная вспышка является первым событием C класса, в котором наблюдалось гелиосейсмическое возмущение. Задачей главы является исследование электрических токов в плотных слоях солнечной атмосферы как потенциального механизма энергосвободы и генерации гелиосейсмического возмущения в выбранной солнечной вспышке. Используются данные наблюдений AIA/SDO, фильтрограммы, доплерограммы и измерения вектора магнитного поля по данным HMI/SDO, измерения потоков рентгеновского излучения RHESSI и GOES. Исследования, описываемые в данной главе, основаны на работе [Sharykin et al., 2015].

Описание исследуемой солнечной вспышки представлено в разделе 4.2, где приводятся временные профили рентгеновского излучения по данным RHESSI и GOES, а также представлены данные наблюдений HMI/SDO. Приведена диаграмма время-расстояние, показывающая динамику гелиосейсмического возмущения в сравнении с предсказанием лучевой теории. Показано, что месторасположение генерации гелиосейсмического возмущения (небольшое локализованное возмущение на магнитограмме и доплерограмме) соответствует более слабому источнику жесткого рентгеновского излучения, локализованному в одном из оснований магнитной петли. Данное наблюдение противоречит стандартной теории гелиосейсмического возмущения солнечной вспышки, в которой предполагается, что данное возмущение генерируется за счет проникающих в плотные слои солнечной атмосферы ускоренных электронов.

В разделе 4.3 представлены изображения RHESSI в тепловом и нетепловом диапазонах энергии в сравнении с магнитным полем и ультрафиолетовым изображением AIA. Также проводится анализ интегрального спектра рентгеновского излучения и спектров отдельных источников рентгеновского излучения (метод изображающей спектроскопии).

Раздел 4.4 посвящен анализу динамики вертикального электрического тока и горизонтального электрического поля методами, аналогичным описанным в предыдущей главе (раздел 3.4). Показано, что месторасположение генерации гелиосейсмического возмущения соответствует наиболее сильным электрическим токам во вспышечной области. Также вспышечный процесс коррелирует по времени с динамикой усредненного вертикального электрического тока и горизонтального электрического поля.

В разделе 4.5 приводятся оценки энергетике вспышечного процесса. Показано, что энергия ускоренных электронов сравнима с внутренней энергией плазмы и ее радиационными

потерями. Однако диссипация электрических токов в плазме (в нижних слоях солнечной атмосферы) с низкой проводимостью ($\sim 10^6$ ед. СГС) также компенсирует нагрев плазмы и ее охлаждение. Приводятся оценки различных импульсов, которые могут быть причиной генерации гелиосейсмического возмущения и делается вывод, что быстрая диссипация электрических токов или импульсная сила Лоренца может быть также причиной генерации гелиосейсмического возмущения.

Сценарий развития вспышечного процесса с участием электрических токов в энерговыделении в плотных слоях солнечной атмосферы выходит за рамки рассмотрения стандартной модели эруптивной солнечной вспышки и требует дальнейших многосторонних наблюдательных и теоретических исследований. Исследование вспышечного энерговыделения в нижних слоях солнечной атмосферы представляет особый интерес для солнечной физики в силу того, что физические процессы, развивающиеся в хромосфере и фотосфере, происходят в условиях частичной ионизации и плазменных $\beta \sim 1$. Быстропротекающие явления на Солнце в таких условиях являются слабо изученными и требуют детального моделирования таких ключевых физических процессов для физики солнечной активности как: ускорение заряженных частиц, магнитное пересоединение, перенос излучения в плазме с неравновесной ионизацией и отклонением от локального термодинамического равновесия, амбиполярная диффузия, а также развитие различных неустойчивостей.

В **приложении А** описывается процесс обработки рентгеновских спектров RHESSI в пакетах HESSI_PACKAGE и OSPEX, которые входят в состав Solar Soft. Также приводятся все основные инструментальные эффекты искажающие спектр рентгеновского излучения и метод получения рентгеновского спектра из спектра счетов. В **приложении Б** представлен вывод формул, описывающих спектр рентгеновского излучения, генерируемого ускоренными электронами со степенным спектром. Приводится как вывод формул модели «толстой» мишени [Brown, 1971], так и формул Сыроватского [Syrovatskij and Shmeleva, 1973]. В **приложении В** излагается методика расчета различных каналов вспышечного энерговыделения: кинетическая мощность ускоренных электронов, нагрев плазмы, ее охлаждение.

В **заключении** обсуждаются полученные результаты и сформулированы положения, выносимые на защиту.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Исследована динамика сверхгорячей плазмы (>30 МК) в эруптивной солнечной вспышке X класса и неэруптивной однопетлевой солнечной вспышке C класса [Шарыкин и др., 2015; Sharykin et al., 2014a]. Показано, что для выполнения энергетического баланса и формирования сверхгорячей плазмы во вспышечной области в обоих случаях необходимо рассматривать подавленную на порядок теплопроводность по сравнению с классическим значением.
2. Анализ тепловой и нетепловой компонент рентгеновских спектров солнечной вспышки показал, что динамика термодинамических параметров сверхгорячей плазмы связана с параметрами степенного спектра ускоренных электронов. Это свидетельствует о формировании популяции ускоренных электронов со степенным спектром из популяции тепловых электронов сверхгорячей плазмы [Sharykin et al., 2014a].
3. Выявлена тонкая структура вспышечных лент по Na на наблюдениях телескопа NST обсерватории BBSO [Sharykin & Kosovichev, 2014]. Показано, что вспышечные ленты

организованы в виде тонкой цепочки уярчений с характерным размером ~100 км. Формирование таких уярчений может быть связано с диссипацией электрических токов в нижних слоях солнечной атмосферы.

4. Впервые наблюдалась гелиосейсмическое возмущение во вспышке С класса [Sharykin et al., 2015]. Показано, что гелиосейсмическое возмущение в этом событии могло быть сформировано в нижних слоях солнечной атмосферы за счет диссипации электрических токов.
5. На основе многоволновых наблюдений солнечных вспышек подтверждено, что первоначальное энерговыделение солнечных вспышек может развиваться не только в короне, но и в нижних слоях солнечной атмосферы [Sharykin & Kosovichev, 2014; Sharykin et al., 2015].

Публикации автора по теме диссертации:

1. Zimovetz I.V., Vilmer N., Chian A. C.-L., **Sharykin I.N.**, Struminsky A.B., *Spatially resolved observations of a split-band coronal type II radio burst* // *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 547, 13, 2012.
2. **Шарыкин И.Н.**, Струминский А.Б., Зимовец И.В. *Энергетика и морфология мощных импульсных вспышек* // ПАЖ, том 38: с. 1-10, 2012.
3. **Sharykin I.N.**, Kosovichev A.G., *Fine structure of flare ribbons and evolution of electric currents* // *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 788, L18(7pp), 2014.
4. **Sharykin I.N.**, Liu S., Fletcher L., *Onset of Electron Acceleration in a Flare Loop* // *The Astrophysical Journal*, Vol. 793, 25, 2014a.
5. **Шарыкин И.Н.**, Струминский А.Б., Зимовец И.В. *Нагрев плазмы до сверхвысоких температур (>30 MK) в солнечной вспышке 9 августа 2011 года* // ПАЖ, том 41, 1-15, 2015.
6. **Sharykin I. N.**, Kosovichev A. G., Zimovets I. V. *Energy Release and Initiation of Sunquake in C-class Flare* // *Astrophys. J.*, Vol. 807, 9 pp., 2015.
7. **Sharykin I. N.**, Kosovichev A. G. *Dynamics of Electric Currents, Magnetic Field Topology and Helioseismic Response of a Solar Flare* // *Astrophys. J.*, Vol. 808, 9 pp, 2015a.
8. Sadykov V. M., Vargas-Dominguez S., Kosovichev A.G., **Sharykin I. N.**, Struminsky A.B., Zimovets I.V., *Analysis of IRIS and NST observations of the 12.06.2014 flare event*, *The Astrophysical Journal*, Vol. 805, 167 (15 pp), 2015.
9. **Sharykin I.N.**, Struminsky A.B., Zimovets I.V. Gan W. *Solar flares with similar soft but different hard X-ray emissions: case and statistical studies*, принята к печати в журнал *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015b.

Благодарности

Автор выражает большую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Струминскому Алексею Борисовичу, благодаря поддержке, которого стало возможным провести исследования, завести множество знакомств в международном и отечественном научном сообществе, подготовить тексты статей и самой диссертационной работы.

Также автор выражает благодарность к.ф.-м.н. Зимовцу Ивану Викторовичу, опыт и советы которого помогли при формулировке задач, интерпретации результатов обработки наблюдательных данных и написании статей.

Автор также благодарен коллективу отдела физики Солнца высоких энергий Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Science, а также заведующему отделу Dr. Weiqun

Ган. В особенности, автор признателен Dr. Siming Liu, в соавторстве, с которым была сделана работа, ставшая основой для главы 2.

Материал последних двух глав диссертационной работы основан на работе, сделанной в течение полугодовой стажировки в Big Bear Solar Observatory. Автор признателен руководителю научной работы в обсерватории д. ф.-м. н. Косовичеву Александру Григорьевичу. Также автор благодарен всему научно-техническому персоналу обсерватории.

Автор признателен труду огромного коллектива НАСА за открытые данные космических обсерваторий RHESSI, SDO, FERMI, GOES и SOHO и созданное программное обеспечение для работы с данными наблюдений. Также автор признателен коллективу Nobeyama Radio Observatory, за открытые данные и программное обеспечение.

Работа была выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-02-91165, 12-02-31127, 15-32-21078, 13-02-00202 и гранта президента МК-3931.2013.2.

Цитируемая литература

1. Aschwanden M. The Physics of the Solar Corona // Springer. 2005.
2. Astrelin, V. T., Burdakov, A. V., Postupaev, V. V. Generation of ion-acoustic waves and suppression of heat transport during plasma heating by an electron beam // Plasma Physics Reports, 24, 414–425, 1998.
3. Бойко А.Я., Ливфшиц М.А. Газодинамический отклик атмосферы на импульсный нагрев: двухтемпературное приближение // Астрон. Ж., Том. 72, сс. 381-391, 1995.
4. Brown J.C. The Deduction of Energy Spectra of Non-thermal Electrons in Flares from the Observed Dynamic Spectra of Hard X-ray Bursts // Solar Physics, Vol. 18, pp. 489-502, 1971.
5. Caspi A., Lin R.P. RHESSI Line and Continuum Observations of Super-hot Flare Plasma // Astrophys J. Let., Vol. 725, pp. L161-L166, 2010.
6. Caspi A., Krucker S., Lin R.P. Statistical Properties of Super-hot Solar Flares // Astrophys. J., Vol. 781, 11 pp., 2014.
7. Dere K.P., Landi E., Young P.R. CHIANTI - an atomic database for emission lines. IX. Ionization rates, recombination rates, ionization equilibria for the elements hydrogen through zinc and updated atomic data // Astron. Astrophys., Vol. 498, pp. 915-929, 2009.
8. Dulk G.A. Radio Emission from the Sun and Stars // Ann. Rev. Astron. Astrophys., Vol. 23, pp. 169-224, 1985.
9. Fisher G.H., Canfield R.C., McClymont A.N. Flare Loop Radiative Hydrodynamics. V. Response to Thick-target Heating // Astrophys. J., Vol. 289, pp. 414-424, 1985.
10. Goode P.R., Cao W. The 1.6 m Off-Axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear // The Second ATST-EAST Meeting: Magnetic Fields from the Photosphere to the Corona. ASP Conference Proceedings, Vol. 463, p. 357, 2012.
11. Hirayama T. Theoretical Model of Flares and Prominences. I: Evaporating Flare Model // Solar Physics, Vol. 34, pp. 323-328, 1974.
12. Janvier M., Aulanier G., Bommier V., Schmieder B., Demoulin P., Pariat E. Electric Currents in Flare Ribbons: Observations and Three-dimensional Standard Model // Astrophys. J., Vol. 788, 11 pp., 2014.
13. Косовичев А.Г. Численное моделирование тепловых и газодинамических процессов в импульсной фазе солнечных вспышек // Изв. Крым. Астрофиз. Обс., Том. 75, сс. 8-21, 1986.
14. Костюк Н.Д., Пикельнер С.Б. Газодинамика вспышечной области, прогреваемой потоком ускоренных электронов // Астрон. Ж., Том. 51, сс. 1002-1016, 1974.

15. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*, Vol. 275, pp. 17-40, 2012.
16. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Physics*, Vol. 210, pp. 3-32, 2002.
17. Liu W., Petrosian V., Mariska J.T. Combined Modeling of Acceleration, Transport, and Hydrodynamic Response in Solar Flares. I. The Numerical model // *Astrophys J.*, Vol. 702, pp. 1553-1566, 2009.
18. Liu S., Fletcher L. Elementary Energy Release Events in Solar Flares // *Astrophys. J.*, Vol. 701, L31-L38, 2009.
19. Magara T., Mineshige S., Yokoyama T., Shibata K. Numerical Simulation of Magnetic Reconnection in Eruptive Flares // *Astrophys J.*, Vol. 466, pp. 1054-1066, 1996.
20. Mariska J.T., Emslie A.G., Li P. Numerical Simulations of Impulsively Heated Solar Flares // *Astrophys. J.*, Vol. 341, pp. 1067-1074, 1989.
21. McNeice P., McWhirter R.W.P., Spicer D.S. et al. A Numerical Model of a Solar Flare Based on Electron Beam Heating of the Chromosphere // *Solar Phys.*, Vol. 90, pp. 357-382, 1984.
22. Musset S., Vilmer N., Bommier V. Hard X-ray emitting energetic electrons and photospheric electric currents // *ArXiv e-prints*: 1506.02724, 2015.
23. Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*, Vol. 275, pp. 3-15, 2012.
24. Petrosian V., Liu S. Stochastic Acceleration of Electrons and Protons. I. Acceleration by Parallel-Propagating Waves // *Astrophys. J.*, Vol. 610, pp. 550-571, 2004.
25. Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I. et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*, Vol. 275, pp. 207-227, 2012.
26. Syrovatskii S.I., Shmeleva O.P. Heating of Plasma by High-energy Electrons, and Nonthermal X-ray Emission in Solar FLares // *Soviet Astronomy*, Vol. 16, pp. 273-283, 1972.
27. Tsuneta S. Moving Plasmoid and Formation of the Neutral Sheet in a Solar Flare // *Astrophys. J.*, Vol. 483, pp. 507-514, 1997.
28. Woods T.N., Eparvier F.G., Hock R. et al. Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments // *Solar Physics*, Vol. 275, pp. 115-143, 2012.
29. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Particle Acceleration and Plasma Heating in the Chromosphere // *Solar Phys.*, Online First, 2015.