

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Грицык Павел Александрович

**Аналитические модели ускорения и
взаимодействия с атмосферой Солнца электронов
во время вспышки**

Специальность 01.03.03 —
«Физика Солнца»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в отделе физики Солнца Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель: Сомов Борис Всеволодович —
доктор физ.-мат. наук, профессор

Официальные оппоненты: Богачёв Сергей Александрович —
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН,
Физический институт РАН,
главный научный сотрудник

Кузнецов Владимир Дмитриевич —
доктор физ.-мат. наук,
Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн РАН,
директор

Струминский Алексей Борисович —
доктор физ.-мат. наук, доцент,
Институт космических исследований РАН,
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 16 октября 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу:
ауд. 2-15, 19-й корпус МГУ, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 119991, Москва.
E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ им. М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:
<http://istina.msu.ru/dissertations/227655642>

Автореферат разослан 12 сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук



Н. А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Согласно основополагающим теоретическим представлениям о механизме солнечных вспышек [1–4] источником энергии вспышки являются сильные магнитные поля в атмосфере Солнца. В упомянутых классических работах была показана ключевая роль своеобразного перераспределения потоков магнитного поля, меняющего их топологическую связность – магнитного пересоединения.

Существование магнитного пересоединения, как фундаментального механизма первичного энерговыделения в солнечных вспышках, в настоящее время подтверждается данными современных спутниковых наблюдений [5], а общая картина вспышки и ее сценарий считаются известными [6–11]. Перед началом импульсной фазы, которая длится от нескольких секунд до нескольких десятков секунд, в короне формируются условия, необходимые для быстрого магнитного пересоединения. В процессе такого пересоединения происходит ускорение электронов, протонов и других ионов до энергий, намного превышающих тепловые энергии частиц в короне и хромосфере [12, 13].

Как известно, электроны обладают много меньшей массой по сравнению с протонами и в процессе ускорения легко приобретают скорости, намного превышающие тепловые в плазме. Эти частицы (будем называть их энергичными) убегают из области ускорения, пересоединяющего токового слоя, и быстро распространяются вдоль пересоединенных линий магнитного поля в короне и хромосфере Солнца.

Из-за низкой плотности плазмы в короне ($\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$) длина свободного пробега энергичных электронов велика, и такие частицы почти без кулоновских потерь энергии (энергетический спектр электронов можно считать неизменным) преодолевают этот участок пути вдоль пересоединенных линий магнитного поля. Даже сравнительно редкие столкновения приводят к генерации тормозного жесткого рентгеновского излучения в короне, которое хорошо описывается в рамках классической модели тонкой мишени (см. обзор [14]).

Проникая в хромосферу, где плотность плазмы существенно выше ($\gtrsim 10^{11} \text{ см}^{-3}$), электроны быстро теряют кинетическую энергию за счет кулоновских столкновений. Здесь, как и в короне, они генерируют жесткое рентгеновское излучение, причем довольно часто наиболее интенсивное. Для описания эволюции функции распределения энергичных частиц при их распространении в хромосфере широко используется упрощенная модель толстой мишени [15], которая приближенно учитывает эффект столкновительного рассеяния электронов пучка. Следствием данного упрощения является ограничение области применения модели небольшими глубинами проникания электронов в мишень. Для интерпретации наблюдений более подходя-

щей является классическая модель Сыроватского и Шмелевой [16], основанная на аналитическом решении соответствующего кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау и, таким образом, аккуратно учитывающая столкновения.

Более современные по сравнению с классическими моделями толстой и тонкой мишени модели следующего поколения [17, 18] учитывают электрическое поле обратного тока, существование которого видится очевидным. Действительно, из области ускорения в корону и хромосферу Солнца высыпается большое количество заряженных частиц [19], создающих электрический ток $j_{dc} \gtrsim 10^{17}$ А. Соответствующих этим токам магнитных полей ($B_0 \gtrsim 10^5$ Гс), тем не менее, в солнечных вспышках не наблюдается. Это связано с возникновением электростатического и индукционного электрических полей в сверхпроводящей плазме солнечной атмосферы, под действием которых тепловые частицы создают обратный ток, компенсирующий ток прямой. Разумеется, суммарное электрическое поле действует также и на электроны пучка, значительно изменяя характер их распространения. Таким образом, получить корректные значения [A3] плотности потока энергии, переносимой ускоренными электронами, а также величины поляризации генерируемого ими жесткого рентгеновского излучения в отсутствие указанного эффекта затруднительно.

В настоящее время достигнута столь высокая точность приемников электромагнитного излучения на космических аппаратах [20, 21], при которой данные рентгеновских наблюдений корональных и хромосферных источников, а также их сопоставление с данными в других диапазонах (например, микроволновом), позволяют проверить корректность существующих модельных представлений о вспышках.

На примере солнечной вспышки 19 июля 2012 г. в работе рассмотрены две ключевых проблемы, связанных с одновременными наблюдениями коронального и хромосферного источников жесткого рентгеновского излучения во время импульсной фазы. Первая из них – интерпретация наблюдаемого соотношения показателей наклонов спектров не имеет решения в рамках классических представлений (тонкой и толстой мишени), но успешно устраняется использованием более точной модели толстой мишени с обратным током [A1] без необходимости дополнительных предположений. Вторая – интерпретация наблюдаемого соотношения интенсивностей. Проблема находит свое решение благодаря тому, что указанное отношение напрямую зависит от того, сколь эффективно работают бетатронный нагрев и ускорение Ферми первого порядка внутри вспышечных петель, которые играют роль так называемых *коллапсирующих* магнитных ловушек [22].

Это дополнительное увеличение энергии электронов во время импульсной фазы вспышки имеет принципиальное значение для правильной интерпретации современных наблюдений. Дело в том, что в некоторых вспышках учета первичного ускорения в пересоединяющем токовом слое оказывается

недостаточно (см., например, раздел 3.3.2 в [9]). Сценарий доускорения электронов одной популяции (ускорение в токовом слое плюс последующее ускорение тех же электронов в коллапсирующей магнитной ловушке) предложен в [22], назван *двухшажным* ускорением (double step acceleration) и до настоящего времени не был подтвержден убедительными наблюдениями вспышек, оставаясь преимущественно теоретическим предсказанием. Указанный эффект не следует путать с так называемым двухфазным ускорением, когда первично ускоренные электроны во время импульсной фазы вспышки (несколько секунд или десятков секунд) ускоряются до релятивистских энергий (как ранее предполагалось, на ударных волнах) существенно позже, во время второй фазы вспышки с запаздыванием от нескольких минут до часов [23].

В связи с развитием космических наблюдений Солнца классические кинетические модели [16] и в особенности модели "упрощенные классические" [15] либо не обеспечивают необходимой точности, либо не применимы для интерпретации некоторых событий [24, A3–A5]. Между тем, в современных численных моделях вспышки [9] кинетическая задача о распространении во вспышке ускоренных частиц рассматривается в достаточно общей постановке, но большое количество модельных параметров вместе с высокими вычислительными затратами затрудняют понимание главных физических процессов, их место и роль в солнечной вспышке.

Исследование механизмов ускорения заряженных частиц и их взаимодействия с атмосферой Солнца во время вспышек на основе современных наблюдательных данных, получаемых космическими и наземными обсерваториями, и теоретических методов (аналитических и численных) – ключевая проблема современной физики Солнца, имеющая фундаментальное значение.

Цели и задачи

Целью данной диссертационной работы являются исследования физических процессов, определяющих наблюдаемые в жестком рентгеновском диапазоне характеристики солнечной вспышки, и построение на их основе аккуратной аналитической модели распространения электронов в атмосфере Солнца, в которой учтены эффект обратного тока и механизм быстрого двухшажного ускорения электронов во время импульсной фазы вспышки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформулировать кинетическую задачу о нетепловых энергичных электронах в солнечных вспышках с учетом эффекта обратного тока в короне и хромосфере.
2. Найти точное аналитическое решение указанной кинетической задачи.
3. Промоделировать отобранные вспышечные события в рамках предложенной аналитической модели ускорения и распространения электронов во время импульсной фазы исследуемых солнечных вспышек.

4. Сравнить результаты моделирования с данными рентгеновских и (в качестве дополнительной проверки) микроволновых наблюдений на момент импульсной фазы, определить роль основных физических механизмов в формировании наблюдаемой картины солнечной вспышки.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования в диссертационной работе выбрано явление солнечной вспышки. Предметом исследования являются механизмы ускорения и распространения в атмосфере Солнца электронов, ускоренных во время ее импульсной фазы.

Научная новизна

1. Впервые предложена самосогласованная модель распространения ускоренных электронов в короне и хромосфере Солнца, в которой учтены эффект обратного тока вместе с эффектом их дополнительного ускорения в коллапсирующих магнитных ловушках.
2. Впервые найдено точное аналитическое решение кинетической задачи о нетепловых электронах, убегающих из области ускорения – пересекающего высокотемпературного токового слоя, в которой учтен эффект обратного тока.
3. В рамках модели толстой мишени с обратным током на примере солнечных вспышек 6 декабря 2006 г. и 19 июля 2012 г. впервые показано, что в солнечных вспышках (особенно больших) плотность потока энергии, переносимой ускоренными электронами на порядок превышает значения, полученные в приближении классической модели толстой мишени. Для вспышки 6 декабря 2006 г. эта величина составляла $\gtrsim 10^{13}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.
4. На примере солнечной вспышки 19 июля 2012 г., в которой одновременно наблюдались корональный и хромосферный источники жесткого рентгеновского излучения, впервые обнаружены наблюдательные подтверждения существования и высокой эффективности ускорения электронов в корональных магнитных ловушках во время солнечных вспышек.

Теоретическая и практическая значимость

Проведенные в настоящей работе исследования свидетельствуют о необходимости учета эффекта обратного тока в различных по мощности и продолжительности вспышках на Солнце. В частности, в рамках классических моделей тонкой и толстой мишени невозможно объяснить наблюдаемое соотношение показателей наклона спектров коронального и хромосферного источников жесткого рентгеновского излучения в солнечной вспышке 19 июля 2012 г.

На примере данной вспышки также показано, что современные кине-

тические модели должны учитывать эффект ускорения электронов в коллапсирующих корональных магнитных ловушках. Без учета данного эффекта затруднительно интерпретировать наблюдаемые интенсивности жесткого рентгеновского излучения в вершине и основаниях вспыхивающих петель.

Предложенная в настоящей работе самосогласованная кинетическая модель является аналитической (найден аналитическое решение для функции распределения энергичных электронов), а также она имеет небольшое число входных параметров. Применение такой модели позволяет детально исследовать физическую картину распространения в атмосфере Солнца ускоренных во вспышке электронов при минимальных затратах вычислительных ресурсов, но с точностью, соответствующей возможностям современных приборов для наблюдения Солнца на космических аппаратах. Те физические процессы, которые исследованы в рамках настоящей работы применительно к солнечным вспышкам, могут иметь гораздо более широкие приложения в задачах современной астрофизики – всюду, где реализуется магнитное пересоединение в сильном магнитном поле и связанные с пересоединением вторичные процессы (быстрые направленные течения плазмы, ускорение заряженных частиц, мощные тепловые потоки, жесткое электромагнитное излучение и т.д.).

Методология исследования

Проведенные в диссертационной работе исследования в своей основе опираются на классические труды отечественных и зарубежных ученых, изучавших вопросы распространения в атмосфере Солнца ускоренных во вспышке заряженных частиц, и в значительной мере уточняют и обобщают их. Аналитические решения были использованы для численного расчета характеристик тормозного жесткого рентгеновского излучения с классическим выражением Бете-Гайтлера для его сечения. Результаты расчетов непосредственно сравнивались с данными спутниковых наблюдений конкретных солнечных вспышек.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Самосогласованная кинетическая задача о распространении в атмосфере Солнца ускоренных во вспышке электронов имеет точное аналитическое решение, двумерность которого в пространстве скоростей определяет большие преимущества модели по сравнению с одномерными по скорости классическими моделями.
2. Наблюдаемая интенсивность жесткого рентгеновского излучения в хромосфере при учете в модели эффекта обратного тока обеспечивается существенно большей, в сравнении с классическими моделями без обратного тока, плотностью потока энергии, переносимой ускоренными электронами ($\gtrsim 10^{13}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в больших вспышках).
3. Эффективность дополнительного ускорения электронов посредством

ускорения Ферми первого порядка и бетатронного нагрева внутри корональных магнитных ловушек, во время импульсной фазы солнечных вспышек, подтверждается результатами наблюдений и моделирования вспышки 19 июля 2012 г.

4. Вследствие действия электрического поля обратного тока на ускоренные во вспышке электроны ожидаемая степень поляризации генерируемого ими жесткого рентгеновского излучения имеет небольшие значения ($\lesssim 3\%$).

Степень достоверности

Достоверность результатов диссертации подтверждается хорошим согласием полученных решений и данных многоволновых наблюдений на современных наземных и космических обсерваториях. Общепризнанные в физике солнечных вспышек классические модели распространения ускоренных во вспышке электронов являются частными случаями предложенной в настоящей работе аналитической модели, которая при определенных упрощающих приближениях асимптотически в них переходит.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах:

1. VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, Россия, 2010);
2. IAU Symposium 273: Physics of Sun and Star Spots (Вентура, Калифорния, США, 2010);
3. Hinode-4: Unsolved Problems and Recent Insights (Палермо, Италия, 2010);
4. VI Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2011);
5. VIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, Россия, 2011);
6. VII Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2012);
7. Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы (Москва, Россия, 2012);
8. VIII Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2013);
9. IX Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2014);
10. 40th COSPAR Scientific Assembly (Москва, Россия, 2014);
11. X Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2015);
12. XII съезд Международной общественной организации «Астрономиче-

ское общество» и приуроченная к нему научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей» (Москва, Россия, 2015);

13. XI Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2016);
14. European Geosciences Union General Assembly 2016 (Вена, Австрия, 2016);
15. Ломоносовские чтения - 2016 (Москва, Россия, 2016);
16. IAU Symposium 335. Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts (Эксетер, Великобритания, 2017);
17. XII Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Россия, 2018);
18. Общественный научный семинар «Плазменная астрофизика и физика Солнца» им. С.И. Сыроватского (Москва, Россия, 2018).
19. Научный семинар НИИЯФ МГУ «Астрофизика космических лучей и физика космоса» (Москва, Россия, 2018).

Личный вклад

Автором лично получены все аналитические решения, на основе которых проведены модельные расчеты на персональном компьютере. Для этого автором было разработано необходимое программное обеспечение. Теоретические выводы, сделанные на основе полученных решений, автором сопоставлены с данными наблюдений. Анализ таких данных осуществлялся с использованием пакета программ SolarSoft.

Вклад автора при подготовке основных публикаций (A1 – A6) и докладов на конференции является определяющим.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 6 научных статьях в рецензируемых журналах из списков Scopus, Web of Science и RSCI.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 132 страницы, включая 22 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 135 наименований.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-02-00585А).

Содержание работы

Во **Введении** сформулированы цель диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены список публикаций автора и выступлений, на которых полученные результаты были представлены. В разделе присутствует обзор литературы в виде ссылок на классические и основополагающие работы по теме диссертации, достаточный для понимания постановки задачи и ее актуальности.

В **Главе 1** сформулирована общая постановка задачи об энергичных (нетепловых и тепловых) электронах, убегающих из первичного источника ускорения во время импульсной фазы солнечной вспышки. Был рассмотрен типичный сценарий вспышки, который схематически, но с учетом последовательности физических процессов и их взаимного расположения, показан на рис. 1. Из солнечной короны плазма с "вмороженным" [2], сильным магнит-

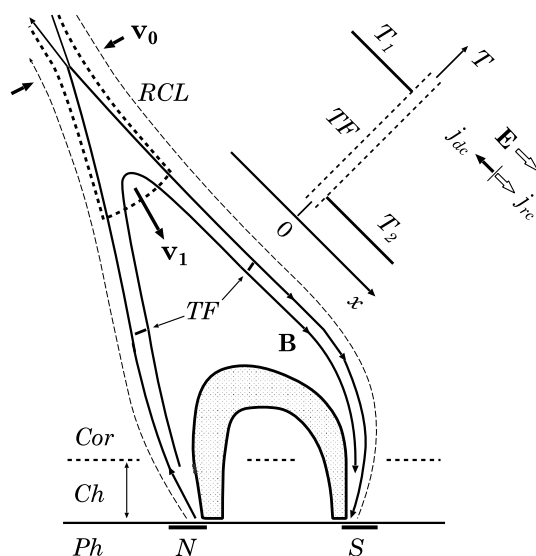


Рисунок 1. Наиболее существенный фрагмент классической картины солнечной вспышки. Ускоренные в пересоединяющем токовом слое RCL электроны убегают из сверхгорячей плазмы с температурой T_1 через турбулентный фронт TF в менее горячую (более холодную) плазму мишени с температурой T_2 . Стрелками с учетом знака заряда электрона показаны направления прямого (j_{dc}) и обратного (j_{rc}) токов; E – вектор напряженности электрического поля обратного тока.

ным полем втекает в пересоединяющий токовый слой (Reconnecting Current Layer, *RCL*) с относительно небольшой скоростью $v_0 \sim 10$ км/с. Внутри токового слоя условия "вмороженности" нарушаются, и пересоединенные линии магнитного поля вместе со "сверхгорячей" (электронная температура $T_e \gtrsim 30$ МК) [8], почти бесстолкновительной плазмой движутся из сверхгорячего токового слоя в противоположные стороны (преимущественно вверх и вниз) со скоростями $v_1 \sim 10^3$ км/с. Тормозное излучение электронов сверхгорячей плазмы и ускоренных электронов образует в короне источник жесткого рентгеновского излучения. На рис. 1 показан лишь наиболее яркий фрагмент протяженной области всей вспышки, а именно пересоединенные линии магнитного поля **B**, движущиеся из токового слоя со скоростью v_1 вниз, в направлении к хромосфере *Ch* и фотосфере *Ph*; *N* и *S* – пара источников фотосферного магнитного поля, например, солнечных пятен.

Из токового слоя потоки тепла в виде тепловых волн огромной амплитуды и потоки ускоренных частиц очень быстро распространяются вдоль "вспышечных петель" (см. рис. 1.2.6 в [25]). Фронт тепловой волны в солнечных вспышках при температурах $T_e \gtrsim 10^6$ К сильно турбулизован, и классическая электронная теплопроводность вдоль магнитного поля в нем подавлена. Однако, ускоренные электроны со скоростями больше некоторой критической скорости практически беспрепятственно проникают через турбулентный слой из сверхгорячей ($T_1 \gtrsim 10^8$ К) плазмы в плазму значительно более холодную: $T_2 \gtrsim 10^6$ К в короне, $T_2 \lesssim 10^4$ К в хромосфере. Электроны с меньшими скоростями остаются в сверхгорячем источнике. В контексте моделирования коронального и хромосферного источников тормозного жесткого рентгеновского излучения в работе рассматривались ускоренные электроны, проникающие через турбулентный фронт и распространяющиеся в "холодной" плазме (см. рис. 1).

При моделировании рассматривались исключительно нетепловые электроны, поэтому нижняя граница их энергетического спектра выбиралась так, чтобы исключить вклад тепловой компоненты в функцию распределения. Напротив, из-за больших значений показателя наклона спектров инжекции результаты моделирования слабо чувствительны к ошибкам в выборе верхней энергетической границы, которая в настоящей работе принимается $\mathcal{E}_{max} = 120$ кэВ.

Ускоренные в высокотемпературном пересоединяющем токовом слое электроны распространяются в короне и хромосфере, теряя свою энергию под действием кулоновских столкновений с электронами и протонами плазмы, а также электрического поля обратного тока. Характер движения энергичных электронов в атмосфере Солнца описывается решением соответствующего кинетического уравнения с линеаризованным интегралом столкновений Ландау. Кроме того, в Главе 1 рассмотрены упрощающие предположения и вид кинетического уравнения для электронов высоких энергий.

В Главе 2 методом характеристик получено точное аналитическое

решение двумерного в пространстве скоростей кинетического уравнения, представленного в Главе 1. В рамках самосогласованной интегродифференциальной системы уравнений найдено общее выражение для электрического поля обратного тока. Показано, что функция распределения ускоренных электронов становится более изотропной по мере проникновения электронов в мишень, а с ростом их энергии, напротив, ее анизотропия возрастает.

Как отмечалось, электроны в солнечных вспышках сначала ускоряются электрическим полем в пересоединяющем токовом слое (рис. 1). После этого первого шага в ускорительном процессе они оказываются внутри корональных магнитных ловушек (рис. 2), длина вдоль линий магнитного поля и поперечный размер (толщина) которых быстро уменьшаются [22]. В таких коллапсирующих ловушках захваченные электроны отражаются от ударной волны SW , расположенной на пути высокоскоростного потока плазмы из токового слоя, или от магнитных "зеркал" M_1 и M_2 (рис. 2). При относительно медленном магнитном пересоединении ударная волна может и не возникать, тогда отражение происходит только на магнитных зеркалах M_1 и M_2 [8].

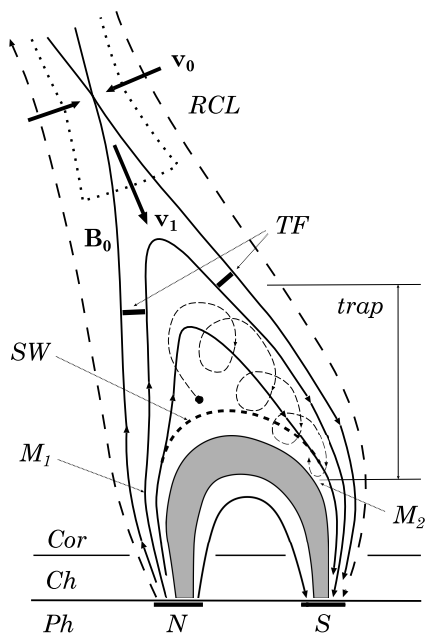


Рисунок 2. RCL – пересоединяющий токовый слой, первичный источник ускоренных электронов. SW – ударная волна над "магнитным препятствием". $trap$ – коллапсирующая магнитная ловушка в короне между турбулентным фронтом TF и магнитными зеркалами M_1 , M_2 . Штрихованной спиралью условно показана траектория электрона, захваченного в ловушку.

Модель таких коллапсирующих магнитных ловушек, которые эффективно ускоряют захваченные электроны, также подробно рассмотрена в Главе 2. В этом контексте сопоставлены два механизма ускорения: ускорение Ферми первого порядка и бетатронный нагрев; оценена их эффективность в ловушках различных типов. Выведена формула для функции распределения электронов, инжектированных в коллапсирующую ловушку. Обсуждены специфические особенности объединенной аналитической модели и возможности их наблюдательного подтверждения.

Глава 3 имеет методический характер и посвящена тормозному жесткому рентгеновскому излучению, генерируемому тепловыми и нетепловыми (ускоренными) электронами. Приведены выражения для дифференциальных сечений тормозного излучения фотонов, а также формулы расчета спектров и величины поляризации для функции распределения энергичных электронов, полученной в данной работе. Обсуждены характерные вид спектра излучения и оценка величины поляризации, которая, как показано в данном разделе диссертации, не превышает $\sim 3\%$.

Дополнительно в Главе 3 рассмотрена методика расчета характеристик микроволнового излучения, в соответствии с которой рассчитан типичный радиоспектр вспышки, и дана физическая интерпретация его особенностей. Данная методика используется для расчета микроволнового спектра солнечной вспышки 19 июля 2012 г. с целью его сравнения с наблюдениями и, как следствие, независимой проверки корректности предлагаемой в работе модели.

В **Главе 4** выполнено теоретическое моделирование вспышек 6 декабря 2006 г. и 19 июля 2012 г. Высокое пространственное, временное и спектральное разрешение космических обсерваторий позволили точно определить положение и размер источников излучения во время импульсной фазы вспышек, характеристики их спектров. Данные события выбраны для моделирования из-за обилия и точности наблюдений. Более того, и это существенно, первая из вспышек расположена на солнечном диске, а вторая – на лимбе.

Солнечная вспышка класса X6.5 наблюдалась 6 декабря 2006 г. одновременно в различных диапазонах электромагнитного спектра на космических обсерваториях Hinode, GOES, TRACE и RHESSI. На момент максимума жесткого рентгеновского излучения имеются наблюдения источника с очень высоким пространственным разрешением: (а) $\approx 0.2''$ для оптического телескопа SOT на спутнике Hinode и (б) $\approx 1''$ для рентгеновского телескопа на спутнике RHESSI. Результаты этих наблюдений и методы обработки данных описаны в [26]. Изображение вспышки в жестком рентгеновском диапазоне представляет собой две вспышечные ленты. Они показаны на левой панели рис. 3. В южной ленте расположен самый яркий источник излучения, угловые размеры которого определены с высокой точностью. Согласно [26] его площадь $S_{HXR} \approx 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^2$ при угловых размерах $\approx 1.1''$. Рентгеновские наблюдения представляют собой результат сложения отдельных измерений спутни-

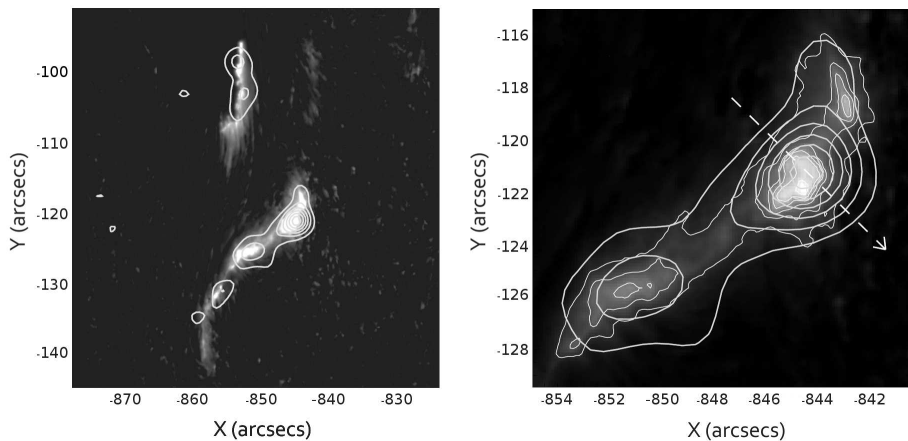


Рисунок 3. Изображения вспышки 6 декабря 2006 г. в полосе G ($4305 \text{ \AA}$), полученные на спутнике Hinode с помощью оптического телескопа SOT на момент максимума первого всплеска жесткого рентгеновского излучения. Слева: вся область вспышки. Справа: южная вспышечная лента с самым ярким источником излучения. Жирными контурами показаны уровни жесткого рентгеновского излучения по данным спутника RHESSI (15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% от максимальной интенсивности). Вдоль пунктирной стрелки определен угловой размер главного источника. Рисунок взят из работы [26].

ка RHESSI на интервале 8 с относительно максимума первого всплеска жесткого рентгеновского излучения.

На рис. 4 показаны результаты наблюдений и расчета спектра жесткого рентгеновского излучения для яркого источника на южной вспышечной ленте. Расчеты были проведены в приближении модели толстой мишени с обратным током (Глава 2). Теоретическая прямая с высокой точностью аппроксимирует наблюдательные данные, что свидетельствует о правильном подборе параметров модели: плотности потока энергии $F \approx 3 \times 10^{13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, переносимой ускоренными электронами, и показателя наклона их спектра инжекции $\gamma_v \approx 3.7$. В приближении классической модели величина плотности потока энергии на порядок меньше $F \sim 10^{12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а спектр инжекции более мягкий $\gamma_v \approx 4.6$. Здесь подразумевается, что на границе инжектированные электроны имеют степенное распределение по вектору скорости v .

Из полученных результатов следует важный вывод о необходимости учета эффекта обратного тока при моделировании вспышек. Действительно, во вспышке 6 декабря 2006 г. высокая интенсивность жесткого рентгеновского излучения при очень малых размерах его источника в хромосфере подра-

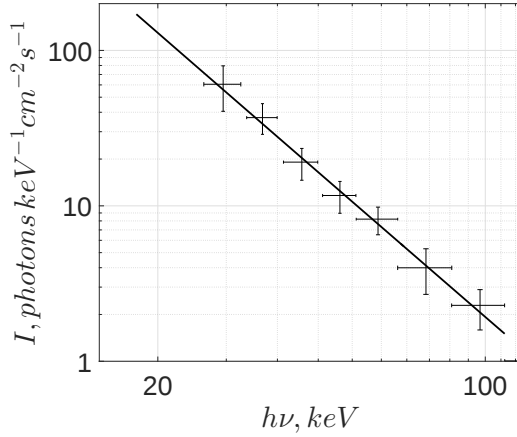


Рисунок 4. Спектр жесткого рентгеновского излучения солнечной вспышки 6 декабря 2006 г. на момент максимума первого всплеска жесткого рентгеновского излучения. Результаты моделирования представлены прямой линией, результаты наблюдений – точками с ошибками. Нижняя граница спектра инжекции ускоренных электронов $\mathcal{E}_{min} \approx 18$ кэВ, верхняя граница $\mathcal{E}_{max} = 120$ кэВ.

зумевают кажущиеся на первый взгляд неправдоподобными плотности потока энергии, на порядок превосходящие значения, полученные в приближении классических моделей (включая упрощенную модель толстой мишени [15]).

Во второй части Главы 4 рассмотрена вспышка 19 июля 2012 г. (балл M7.7), которая наблюдалась на космических обсерваториях RHESSI, GOES и SDO. Высокая точность современных многоволновых приемников излучения и расположение вспышки на краю солнечного диска позволили с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением наблюдать яркие компактные источники излучения и протяженные "вспышечные петли" одновременно в короне и хромосфере [27].

Результаты наблюдений вспышки представлены на рис. 5. В жестком рентгеновском диапазоне видны один корональный и два хромосферных источника. Южный хромосферный источник очень слабый, поскольку частично находится за лимбом. В диссертационной работе исследован северный хромосферный источник излучения в приближение модели толстой мишени с обратным током. Здесь, как и при моделировании вспышки 6 декабря 2006 г., плотность потока энергии ускоренных электронов подбирается так, чтобы спектр хромосферного источника излучения соответствовал наблюдательным данным. Наблюдения со спутника RHESSI приведены в [27] в виде результата сложения отдельных измерений длительностью ~ 8 с на времен-

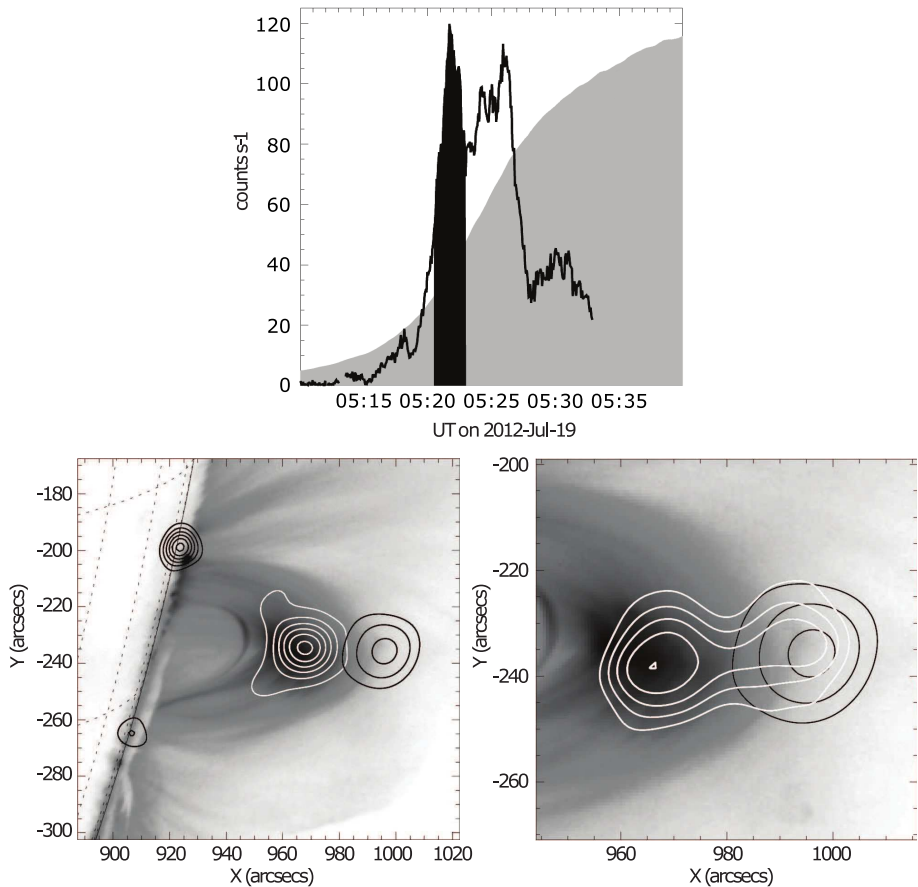


Рисунок 5. Вспышка 19 июля 2012 г, момент максимума первого всплеска жесткого рентгеновского излучения. Верхняя панель: интенсивность излучения от всей вспышки (черная кривая) по данным RHESSI в диапазоне 30–80 кэВ. Серый фон – интенсивность излучения > 3 кэВ согласно GOES. Нижняя панель: фон – изображения на длине волны 193 Å, полученные на SDO с помощью ультрафиолетового телескопа AIA. Система вспышечных петель с корональным и хромосферными источниками видна на изображении слева, корональный источник – справа. Черными контурами показаны уровни излучения по данным RHESSI в диапазоне 30–80 кэВ. Белые контуры тоже по данным RHESSI – уровни излучения: диапазон 6–8 кэВ слева и 16–18 кэВ справа. Рисунок взят из работы [27].

ном интервале ~ 150 с, показанном на рис. 5 темной вертикальной полосой с центром в первом максимуме всплеска жесткого рентгеновского излучения (05:21:45 UT).

На рис. 6 сплошной прямой линией представлен спектр жесткого рентгеновского излучения хромосферного источника во вспышке 19 июля 2012 г., рассчитанный в модели толстой мишени с обратным током. Видно, что рас-

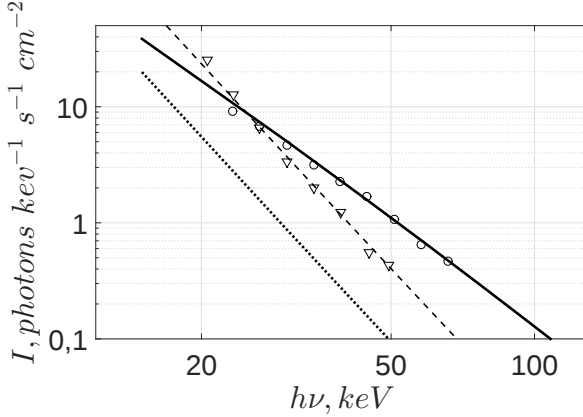


Рисунок 6. Наблюдаемые и рассчитанные спектры жесткого рентгеновского излучения солнечной вспышки 19 июля 2012 г. Результаты моделирования хромосферного источника представлены сплошной прямой линией, наблюдения – кружками. Моделирование коронального источника без учета ускорения электронов в коллапсирующей магнитной ловушке – пунктирная прямая, с учетом – штриховая прямая, результаты наблюдений – треугольниками. Нижняя граница энергетического спектра ускоренных электронов $\mathcal{E}_{min} \approx 15$ кэВ, верхняя $\mathcal{E}_{max} = 120$ кэВ.

считанный спектр хорошо совпадает с результатами наблюдений хромосферного источника (кружочки), как по интенсивности излучения, так и по наклону спектра. Следовательно, такие параметры модели, как плотность потока энергии $F \approx 5 \times 10^{10}$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, переносимой энергичными электронами, и показатель наклона спектра инжекции $\gamma_v \approx 4.5$, подобраны верно. Как и ранее, были сделаны оценки величины плотности потока энергии в приближении классической модели толстой мишени $F \approx 10^{10}$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и показателя наклона спектра инжекции $\gamma_v \approx 4.6$.

Спектр коронального источника, рассчитанный в приближении тонкой мишени без учета эффекта коллапсирующих магнитных ловушек, показан на рис. 6 пунктирной прямой. Она имеет тот же наклон, что и наблюдаемый

спектр коронального источника (треугольники), но расположена существенно ниже его. Исходя из этого факта мы видим, что в рамках классических моделей тонкой и толстой мишени принципиально невозможно моделировать наблюдаемые спектры коронального и хромосферного источников жесткого рентгеновского излучения, генерируемого одной популяцией ускоренных электронов.

Действительно в классической модели всегда $\varphi_{Cor} - \varphi_{Ch} = 2$, а по данным наблюдений вспышки 19 июля 2012 г. $\varphi_{Cor} - \varphi_{Ch} \approx 1.6$. В модели с обратным током наблюдаемое соотношение показателей наклонов получается естественным образом. Приближение толстой мишени с обратным током не только точно описывает рентгеновский спектр хромосферного источника, но и позволяет правильно определить показатель наклона спектра излучения в короне.

Рассчитанная в рамках указанной модели величина интенсивности излучения коронального источника (пунктирная прямая на рис. 6) ниже наблюдаемой в ≈ 4.5 раза. Столь большое различие рассчитанной и наблюдаемой интенсивностей при точном совпадении показателей наклона спектра излучения является весомым аргументом в пользу наличия и высокой эффективности ускорения электронов в коллапсирующих магнитных ловушках, которые образуют пересоединенные линии магнитного поля (рис. 2). Такая картина солнечных вспышек была предсказана в теоретических работах [22, 28], но в отсутствии космических экспериментов с высоким разрешением до настоящего времени не имела убедительных наблюдательных подтверждений.

В **Заключении** приведены следующие основные результаты работы:

1. Построена самосогласованная кинетическая модель распространения в атмосфере Солнца энергичных электронов во время импульсной фазы вспышки. Получены аналитические решения двух кинетических задач, описывающих следующие процессы.

(А) Распространение в короне и хромосфере энергичных электронов, предварительно ускоренных в пересоединяющем высокотемпературном (сверхгорячем) токовом слое. Принципиальные особенности модели – двумерность в пространстве скоростей и учет электрического поля обратного тока.

(Б) Дополнительное ускорение в корональных коллапсирующих магнитных ловушках посредством бетатронного нагрева и ускорения Ферми первого порядка.

2. Показано, что в короне внутри коллапсирующих ловушек энергичные электроны генерируют всплески тормозного жесткого рентгеновского излучения. Последние могут наблюдаться при достаточно большой мере эмиссии, которая, в свою очередь, зависит от концентрации тепловых электронов внутри ловушки.

Высыпающиеся из коллапсирующих ловушек в хромосферу энергичные электроны генерируют большие всплески жесткого рентгеновского из-

лучения в основаниях вспыхивающих петель.

Оба типа всплесков доступны всестороннему излучению на современных космических обсерваториях.

3. Результаты моделирования вспышки 6 декабря 2006 г. продемонстрировали следующие особенности самосогласованной кинетической модели.

(А) В мощных вспышках балла X плотность потока энергии, переносимой энергичными электронами, может достигать огромных значений, $\gtrsim 10^{13}$ эрг см⁻² с⁻¹.

(Б) Под действием электрического поля обратного тока энергичные электроны частично возвращаются обратно в источник и обеспечивают дополнительный, в сравнении с классической моделью толстой мишени без обратного тока, нагрев корональной плазмы.

4. Необходимость учета эффекта обратного тока подтверждена на примере солнечной вспышки 19 июля 2012 г. Разность показателей наклона наблюдаемых спектров жесткого рентгеновского излучения в короне и хромосфере $\varphi_{Cor} - \varphi_{Ch} \approx 1.6$, что не соответствует предсказаниям классической модели без обратного тока, в рамках которой $\varphi_{Cor} - \varphi_{Ch} = 2$. В приближении толстой мишени с обратным током наблюдаемое соотношение показателей наклона получается естественным образом без каких-либо дополнительных предположений.

5. На примере солнечной вспышки 19 июля 2012 г. обнаружены наблюдательные подтверждения существования и высокой эффективности ускорения электронов в корональных коллапсирующих магнитных ловушках. Для указанной вспышки 19 июля 2012 г. непосредственные наблюдения источников жесткого рентгеновского излучения на момент начала импульсной фазы вспышки, когда наблюдался яркий корональный источник в отсутствии излучения из хромосферы.

Принципиальным подтверждением ускорения электронов в коллапсирующих магнитных ловушках является точное воспроизведение показателя наклона спектра коронального источника жесткого рентгеновского излучения, идеально совместимое с результатами моделирования источника излучения в хромосферных основаниях вспыхивающих петель.

6. Показано, что степень поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек невелика и составляет $\lesssim 3\%$. Такие расчеты необходимы ввиду отсутствия достоверных результатов внеатмосферных измерений поляризации. Можно надеяться, что в космических экспериментах ближайшего будущего поляризация жесткого рентгеновского излучения вспышек будет измерена с достаточно высокой точностью. Это обеспечит еще один независимый способ проверки модельных представлений о вспышках на Солнце.

7. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить расчеты в рамках предложенных в настоящей работе аналитических моде-

лей, визуализировать их результаты, проводить сравнение с данными спутниковых и наземных наблюдений солнечных вспышек.

* * *

Полученные в настоящей работе результаты весьма актуальны и (при всей своей завершенности на данный момент в полном соответствии современному уровню наблюдений Солнца) предлагают дальнейшие направления исследований, связанные с перспективными внеатмосферными и наземными наблюдениями, а также более детальным кинетическим описанием солнечных вспышек.

Во-первых, предполагается обработка новых высокоточных наблюдений вспышек с яркими корональными источниками жесткого рентгеновского излучения с целью их моделирования и дополнительного подтверждения выводов данной работы об эффективности коллапсирующих магнитных ловушек в короне.

Во-вторых, современные разработки наземных оптических наблюдений обещают получение томографических разрезов активных областей и вспышек, что позволило бы регистрировать поля скоростей на разных уровнях в атмосфере Солнца.

В-третьих, в контексте будущих высокоточных измерений поляризации жесткого рентгеновского излучения вспышки, необходимо исследовать вопрос о начальном угловом распределении инжектируемых энергичных электронов.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих научных статьях в рецензируемых журналах из списков Scopus, Web of Science и RSCI:

- [A1] Грицык П. А., Сомов Б. В., Кинетическое описание потока ускоренных электронов в солнечных вспышках // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2011. — Т. 5. — С. 57 – 63. (IF = 0.506)
- [A2] Сомов Б. В., Грицык П. А., О тормозном излучении ускоренных электронов в солнечных вспышках // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2012. — Т. 1. — С. 106 – 112. (IF = 0.506)
- [A3] Грицык П. А., Сомов Б. В., Эффект обратного тока в современных моделях солнечных вспышек: теория и высокоточные наблюдения // Письма в Астрономический журнал. — 2014. — Т. 40, № 8. — С. 554 – 565. (IF = 1.160)
- [A4] Грицык П. А., Сомов Б. В., Рентгеновское и микроволновое излучение солнечной вспышки 19 июля 2012 года: высокоточные наблюдения и кинетические модели // Письма в Астрономический журнал. — 2016. — Т. 42, № 8. — С. 586 – 599. (IF = 1.160)
- [A5] Грицык П. А., Сомов Б. В., Ускорение электронов в магнитных ловушках солнечной вспышки: модельные свойства и их наблюдательные подтверждения // Письма в Астрономический журнал. — 2017. — Т. 43, № 9. — С. 676 – 686. (IF = 1.160)
- [A6] Грицык П. А., Сомов Б. В., Аналитическая модель распространения тепловых убегающих электронов в солнечных вспышках // Письма в Астрономический журнал. — 2019. — Т. 45, № 4. — С. 279 – 289. (IF = 1.160)

Список литературы

- [1] Giovanelli R. G., Chromospheric flares // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1948. — Vol. 108. — P. 163.
- [2] Parker E. N., Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids // Journal of Geophysical Research. — 1948. — Vol. 62. — P. 509.
- [3] Сыроватский С. И., Устойчивость плазмы в неоднородном магнитном поле и механизм солнечных вспышек // Астрономический журнал. — 1962. — Т. 39. — С. 987.
- [4] Сыроватский С. И., Динамическая диссипация магнитного поля и ускорение частиц // Астрономический журнал. — 1966. — Т. 43. — С. 340.
- [5] Cairns I. H., et al., Low altitude solar magnetic reconnection, type III solar radio bursts, and X-ray emissions // Scientific Reports. — 2018. — Vol. 8. — P. 1676.
- [6] Priest E., Forbes T., Magnetic reconnection: MHD theory and applications. — Cambridge : Cambridge University Press, 2000. — 612 p.
- [7] Somov B. V., Plasma astrophysics. Part I: Fundamentals and practice. Second edition. — New York : Springer Science+Business Media, 2012. — 498 p.
- [8] Somov B. V., Plasma astrophysics. Part II: Reconnection and flares. Second edition. — New York : Springer Science+Business Media, 2013. — 504 p.
- [9] Krucker S., et al., Hard X-ray emission from the solar corona // The Astronomy and Astrophysics Review. — 2008. — Vol. 16. — P. 155.
- [10] Emslie A. G., et al., High-energy aspects of solar flares. — New York : Springer-Verlag, 2012. — 478 p.
- [11] Benz A. O., Flare observations // Living Reviews in Solar Physics. — 2017. — Vol. 14. — P. 2.
- [12] Hudson H. S., Ryan J., High-energy particles in solar flares // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1995. — Vol. 33. — P. 239.
- [13] Miroshnichenko L. I., Solar cosmic rays. — Heidelberg : Springer, 2015. — 521 p.
- [14] Сомов Б. В., Сыроватский С. И., Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками // Успехи физических наук. — 1976. — Т. 120. — С. 217.
- [15] 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. — 1971. — Vol. 18. — P. 489.

- [16] Сыроватский С. И., Шмелева О. П., Нагрев плазмы электронами высоких энергий и нетепловое рентгеновское излучение солнечных вспышек // *Астрономический журнал*. — 1972. — Т. 49. — С. 334.
- [17] Diakonov S. V., Somov B. V., Thermal electrons runaway from a hot plasma during a flare in the reverse-current model and their X-ray bremsstrahlung // *Solar Physics*. — 1988. — Vol. 116. — P. 119.
- [18] Litvinenko Yu. E., Somov B. V., Nonthermal electrons in the thick-target reverse-current model for hard X-ray bremsstrahlung // *Solar Physics*. — 1991. — Vol. 131. — P. 319.
- [19] Hoyng P., et al., High time resolution analysis of solar hard X-ray flares observed on board the ESRO TD-1A satellite // *Solar Physics*. — 1976. — Vol. 48. — P. 197.
- [20] Lin R. P., et al., The Reuven Ramaty high-energy solar spectroscopic imager (RHESSI) // *Solar Physics*. — 2002. — Vol. 210. — P. 3.
- [21] Lemen J. R., et al., The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) // *Solar Physics*. — 2012. — Vol. 275. — P. 17.
- [22] Somov B. V., Kosugi T., Collisionless reconnection and high-energy particle acceleration in solar flares // *The Astrophysical Journal*. — 1997. — Vol. 485. — P. 859.
- [23] Sakai J.-I., de Jager C., *Cosmic plasma physics*. — Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. — 192 p.
- [24] Gritsyk P. A., Somov B. V., Electron acceleration in collapsing magnetic traps during the solar flare on July 19, 2012: observations and models // *Proceedings IAU Symposium No 335*. — 2018. — P. 90.
- [25] Somov B. V., *Physical processes in solar flares*. — Dordrecht, Holland : Springer Science+Business Media, Dordrecht, 1992. — 249 p.
- [26] Krucker S., et al., High-resolution imaging of solar flare ribbons and its implication on the thick-target beam model // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 739. — P. 96.
- [27] Krucker S., Battaglia M., Particle densities within the acceleration region of a solar flare // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 780. — P. 107.
- [28] Богачев С. А., Сомов Б. В., Формирование степенных спектров электронов в коллапсирующих магнитных ловушках // *Письма в Астрономический журнал*. — 2007. — Т. 33. — С. 62.