

На правах рукописи

Лысенко Александра Львовна

**Импульсное ускорение заряженных частиц в
солнечных вспышках и их роль в нагреве
плазмы**

Специальность 01.03.03 — физика Солнца

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2020

Работа выполнена в лаборатории экспериментальной астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Научный руководитель: Флейшман Григорий Давидович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе
Distinguished Research Professor
Center for Solar-Terrestrial Research
Physics Department / CSLA
New Jersey Institute of Technology

Официальные оппоненты: Мельников Виктор Федорович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория
Российской академии наук)(ГАО РАН)

Юшков Борис Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория космофизических исследований
НИИЯФ МГУ

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Цупко О. Ю., к.ф.-м.н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Солнечная вспышка – локальное увеличение светимости Солнца, наблюдаемое на всей шкале электромагнитных волн от радиоволн до гамма-излучения. Наблюдения солнечных вспышек продолжаются около полутора веков, при этом начиная с 1940-1960х годов помимо оптического стали доступны радио- и рентгеновский диапазоны. Солнечная вспышка происходит в атмосфере Солнца, где над газокинетической энергией доминирует энергия магнитного поля. Считается, что солнечная вспышка является следствием магнитного пересоединения – резкого перестроения структуры магнитного поля в атмосфере Солнца, в результате чего выделяется значительная энергия [1]. Выделенная энергия может расходоваться на ускорение частиц, электронов и ионов, нагрев солнечной плазмы, выброс макроскопического объёма плазмы (корональный выброс массы) и пр.

Магнитное пересоединение, сопровождаемое нагревом плазмы и ускорением частиц, происходит во многих астрофизических объектах [2, 3], но именно исследования Солнца позволяют изучить данные явления в динамике с высоким временным, спектральным и пространственным разрешением.

Несмотря на многолетние наблюдения и теоретические исследования солнечных вспышек, в их физике остаётся ещё немало нерешённых вопросов. В частности, до сих пор неясно, какой механизм или механизмы задействованы в ускорении частиц при магнитном пересоединении, отвечает ли за ускорение один и тот же механизм или на различных пространственных и временных масштабах работают различные механизмы, есть ли различия в ускорении электронов и ионов и каковы они. Также открытым остаётся вопрос, чем обусловлено распределение энергии, выделенной при пересоединении, между различными компонентами солнечной вспышки, в частности, между непосредственным нагревом плазмы и ускорением частиц.

Основным источником наблюдательных данных, использованных в работе, является эксперимент по исследованию космических гамма-всплесков *Konus-Wind*. Он проводится с 1994 г. по настоящее время и предоставляет уникальный массив наблюдения солнечных вспышек в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах, активное использование которого в физике Солнца началось относительно недавно. *Konus-Wind* работает в двух режимах – триггерном и фоновом. В фоновом режиме доступны временные профили жёсткого рентгеновского излучения в трёх широких энергетических каналах в диапазоне ~ 20 – 1200 кэВ с разрешением ~ 3 с. В триггерном режиме проводится запись временных профилей в тех же трёх каналах, но с высоким временным разрешением (до 2 мс) в течение ~ 4 минут, одновременно с накоплением многоканальных спектров в диапазоне 20 кэВ–15 МэВ. Широкий энергетический диапазон прибора предоставляет информацию об ускоренных во вспышке электронах и ионах, а высокое временное разрешение в триггерном режиме позволяет оценить характеристики ускорения до малых временных масштабов. За 25 лет наблюдений *Konus-Wind* зарегистрировал

более 1000 вспышек в триггерном режиме и более 13000 – в фоновом. Преимуществом инструмента *Konus-Wind* является его положение вблизи точки Лагранжа L1 системы Земля-Солнце, благодаря чему он наблюдает Солнце практически непрерывно, без затенений Землёй и влияния зон захваченной радиации. Сочетание этих факторов делает *Konus-Wind* источником непрерывных данных, исключительно важным как для статистических исследований солнечных вспышек, так и для изучения отдельных вспышек в сочетании с наблюдениями в других диапазонах электромагнитного излучения.

Уникальный набор данных, накопленных инструментом *Konus-Wind* более чем за два полных цикла солнечной активности, был систематизирован и стал доступен для исследований в области физики Солнца в первую очередь благодаря представленной работе. Возросшие за последние десятилетия вычислительные мощности и усовершенствованные алгоритмы и методики позволяют проводить сложные теоретические расчёты и моделирование, что, в сочетании с доступными наблюдательными данными высокого временного, пространственного и спектрального разрешения, позволяет количественно исследовать нерешённые вопросы физики Солнца. Таким образом, задача исследования ускорения частиц в солнечных вспышках и теплового отклика плазмы с привлечением данных нового для физики Солнца эксперимента *Konus-Wind*, данных других диапазонов электромагнитного излучения и моделирования, является актуальной.

Цели и задачи

Первая цель работы заключается в исследовании солнечных вспышек с низким тепловым откликом относительно нетеплового излучения, «холодных вспышек», анализе параметров ускоренных электронов и нагрева плазмы за их счёт. Вторая цель работы состоит в определении характеристик электронов и ионов, ускоренных в мощных солнечных вспышках X-класса.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Сформировать открытую базу данных солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме.
2. По данным наблюдений *Konus-Wind* сформировать выборку вспышек с низким тепловым откликом относительно излучения ускоренных электронов, «холодных вспышек».
3. Для индивидуальных «холодных» вспышек выяснить, какая доля в общем нагреве плазмы обеспечивается исключительно ускоренными частицами, без прямого нагрева плазмы.
4. Исследовать свойства холодных вспышек в рентгеновском и микроволновом диапазонах, определить, в чём заключаются их отличия от опорных вспышек по морфологии и характеристикам ускоренных частиц.
5. Исследовать энергетику и спектральные параметры электронов и ионов, ускоренных в солнечных вспышках X-класса, сопровождавшихся гамма-излучением.

Научная новизна

Следующие исследования проведены впервые:

1. Статистический анализ холодных вспышек как отдельной группы событий.
2. Создание физической модели холодной вспышки с задержкой нагрева, которая объясняет наблюдательные особенности вспышки.
3. Спектральный анализ гамма-излучения солнечных вспышек на коротких временных интервалах (~ 8 с) для выявления эволюции отдельных компонентов излучения, в частности, жёсткого компонента континуума.
4. Оценка спектральной эволюции ускоренных протонов на малом временном масштабе (~ 30 с).

Научная и практическая значимость

Представленная работа вносит вклад в решение фундаментальных проблем физики солнечных вспышек и связанных с ними явлений.

Созданная база данных солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте *Konus-Wind*, используется в исследованиях ускорения частиц, солнетрясений, квазипериодических пульсаций вспышечного излучения (напр. [4, 5, 6]).

Результаты, полученные при изучении холодных вспышек, важны для понимания распределения энергии между компонентами вспышки. Набор холодных вспышек, выделенный в этой работе, используется для анализа энергетики ускоренных частиц и нагрева ими окружающей плазмы [7].

Полученные оценки быстрой эволюции спектра излучения в гамма-диапазоне и спектра ускоренных протонов накладывают ограничения на механизмы ускорения ионов в солнечных вспышках и важны для построения и уточнения параметров их моделей.

Методы исследования

В работе проводится временной и спектральный анализ наблюдений солнечных вспышек в жёстком рентгеновском и гамма-диапазоне экспериментом *Konus-Wind* [8], и рядом инструментов в микроволновом диапазоне. Излучение в жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах предоставляет информацию об ускоренных во вспышке электронах и ионах, в то время как микроволновое излучение позволяет оценить параметры корональной плазмы и электронов, распространяющихся в петлях и/или захваченных в магнитные ловушки. Тепловой отклик плазмы оценивается по излучению в мягком рентгеновском диапазоне по данным мониторов *GOES* и в ультрафиолетовом диапазоне по данным телескопа *SoHO/EIT*.

Анализ спектров солнечных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне при помощи метода наименьших квадратов проводится в пакете *XSPEC* [9], а в мягком гамма-диапазоне для спектрального анализа применяется байесовский подход, реализованный в пакете *SoBAT* [10].

Микроволновые спектры, использованные в работе, получены радиотелескопами Nobeyama Radio Polarimeters (NoRP) [11], Owens Valley Solar Array (OVSA) [12, 13], Kislovodsk Mountain Astronomical Station of the Pulkovo Observatory (KMAS) [14], Solar Radio Spectropolarimeter (SRS) [15] и Badary Broadband Microwave Spectropolarimeters (BBMS) [16] и сетью Radio Solar Telescope Network (RSTN) [17]. Для их анализа применялся пакет *OVSA_explorer* [18], который является частью пакета *solarsoft*.

Помимо спектральных данных в работе используются изображения Солнца в жёстком рентгеновском диапазоне, полученные космической обсерваторией Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (*RHESSI*) [19], в микроволновом диапазоне – радиобсерваторией Nobeyama Radioheliograph (NoRH) [20], в ультрафиолетовом диапазоне – телескопом *SoHO/EIT* [21] и магнитограммы на уровне фотосферы по лучу зрения, полученные инструментом *SoHO/MDI* [21].

Анализ наблюдательных данных дополняется моделированием. Для построения физической модели вспышки с задержкой нагрева применялось трёхмерное моделирование в пакете *GX Simulator* [22].

Основные положения, выносимые на защиту

1. Вспышки со слабым тепловым откликом, «холодные» вспышки, статистически значительно отличаются по своим свойствам от опорных вспышек, они характеризуются более жёсткими спектрами, меньшими длительностями в жёстком рентгеновском и микроволновом диапазонах.
2. Холодные вспышки состоят из двух групп: часть вспышек характеризуется высокими пиковыми частотами гиротронного спектра в микроволновом диапазоне и ассоциируется с компактными петлями с высоким магнитным полем, а другая часть, напротив, очень низкими пиковыми частотами и связана с протяжёнными разреженными петлями.
3. Для холодной вспышки 2002-03-10, показано, что, несмотря на значительную задержку теплового излучения относительно нетеплового, которая достигает нескольких минут, весь наблюдаемый нагрев плазмы обеспечен исключительно энергией, запасённой в ускоренных электронах, без привлечения других механизмов нагрева.
4. Быстрая, на масштабе времени ~ 30 с, спектральная эволюция ускоренных протонов в мощной солнечной вспышке класса X9.3 6 сентября 2017 г., которая позволяет получить ограничения на параметры ускорения.
5. Корреляция спектральной эволюции ускоренных протонов с эволюцией континуума гамма-излучения, порождённого тормозным излучением ускоренных электронов нерелятивистских и среднерелятивистских энергий.

Достоверность полученных результатов:

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием данных широко известных и надёжных астрофизических инструментов, обоснованным выбором методов обработки экспериментальных данных и использованием стандартных программ обработки. Все основные результаты работы подтверждены публикациями в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и индексируемых базами Scopus, Web of Science, РИНЦ.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2015 по 2020 годы и опубликованы в четырёх статьях в реферируемых журналах, и в двух статьях, принятых к публикации. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях:

1. The 4th RadioSun Workshop and Summer School, Irkutsk, Russia, 8-12 June, 2015 (устный доклад);
2. CESRA 2016: Solar radio physics from the chromosphere to near Earth, Orleans, France, 13-17 June, 2016 (устный доклад);
3. 15th RHESSI Workshop, Graz, Austria, 26-30 July, 2016 (устный доклад);
4. Good Hope for Earth Sciences, Cape Town, South Africa, 27 August-1 September, 2017 (устный доклад);
5. European Solar Physics Meeting (ESPM'15), Budapest, Hungary, 4-8 September, 2017 (стендовый доклад);
6. Солнечная и солнечно-земная физика-2017, Санкт-Петербург, Россия, 9-13 октября 2017 года (устный доклад);
7. Физика плазмы в солнечной системе, Москва, Россия, 1-16 февраля, 2018 (устный доклад);
8. 17th RHESSI Workshop, Dublin, Ireland, 18-23 June, 2018 (устный доклад);
9. 18th RHESSI Workshop, Minneapolis, USA, 28 May-1 June, 2019 (устный доклад);
10. 234th meeting of the American Astronomical Society, St. Louis, USA, 9-13 June, 2019 (устный доклад);
11. Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment, St. Petersburg, Russia, 9-13 September, 2019 (устный доклад);
12. PhysicA.SPb/2019, St. Petersburg, Russia, 22-24 октября, 2019 г. (стендовый доклад).

Личный вклад

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были получены соискателем лично или соавторами при непосредственном участии соискателя.

Соискатель внёс основной вклад в создание базы данных KW-Sun, которая содержит более 1000 солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте *Konus-Wind*. Соискателем разработаны методики корректировок данных *Konus-Wind* от искажений вследствие инструментальных эффектов при больших загрузках.

Соискателем был проведён поиск «холодных» вспышек среди триггерных событий, зарегистрированных *Konus-Wind*. Получены характеристики холодных вспышек в рентгеновском диапазоне, проведено сравнение между характеристиками в микроволновом и рентгеновском диапазонах.

Соискатель внёс основной вклад в анализ вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г., основываясь на данных эксперимента *Konus-Wind*: были предложены спектральные модели излучения вспышки в гамма-диапазоне, оценены характеристики ускоренных во вспышке ионов, проведено моделирование, которое позволило оценить быструю спектральную эволюцию ускоренных протонов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, **пяти** глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации **166** страниц, включая **46** рисунков, **11** таблиц. Библиография включает **169** наименований на **15** страницах.

Содержание работы

Во Введении диссертационной работы представлен обзор современного состояния и нерешённых проблем физики солнечных вспышек, обсуждается актуальность, новизна и значимость исследований. Сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, приведен список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена описанию инструментов и методов, использованных в работе.

В Главе 2 приведены статистические исследования солнечных вспышек, зарегистрированных инструментом *Konus-Wind*.

Во Введении к Главе 2 дан обзор статистических исследований свойств солнечных вспышек, проводившихся до настоящего времени, и сформулировано, какие пробелы могут быть заполнены данными *Konus-Wind*.

В Разделе 2.2 приведены особенности наблюдения солнечных вспышек *Konus-Wind*, приведено годовое распределение вспышек *Konus-Wind*, зарегистрированных в триггерном режиме (см. Рис. 1).

Раздел 2.3 содержит краткое описание базы данных KW-Sun, которая содержит многоканальные спектры и кривые блеска всех вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме в 1994-2020 гг.

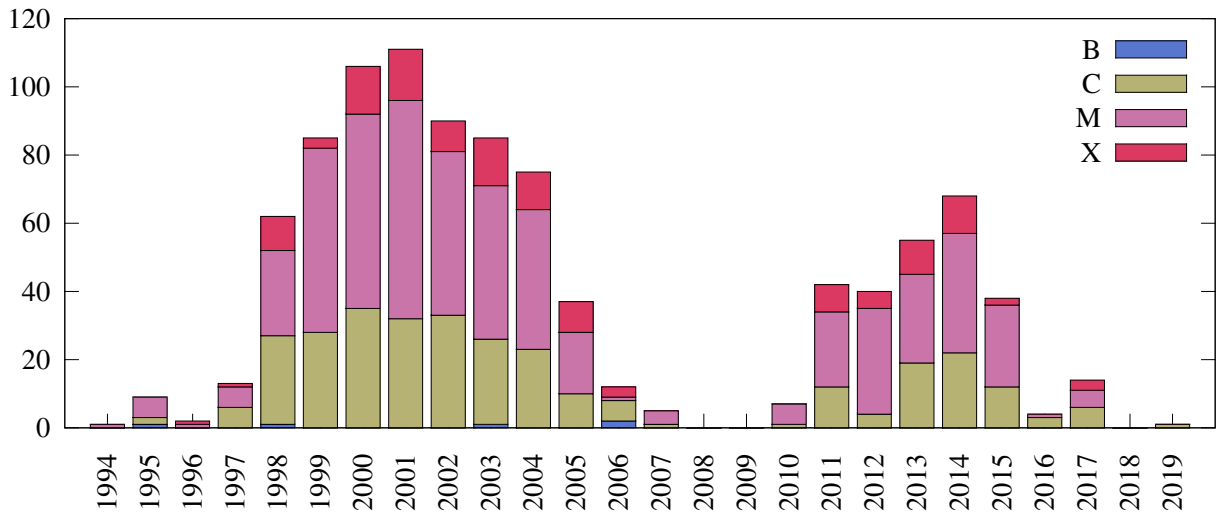


Рис. 1: Годичное распределение количества солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме.

Раздел 2.4 посвящён распределениям свойств солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме: пиковых скоростей счёта в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах и длительностей в жёстком рентгеновском диапазоне.

В заключении к Главе 2 проводится сравнение результатов, полученных в работе, с результатами предыдущих статистических исследований рентгеновских и гамма-вспышек на Солнце.

Глава 3 посвящена статистическому исследованию ранних импульсных холодных вспышек в рентгеновском и микроволновом диапазонах [A1], [A5].

Во Введении к Главе 3 описаны группы вспышек, выделенные по временному соотношению между нетепловым и тепловым излучением: плавные тепловые вспышки, не сопровождающиеся ускорением частиц; импульсные вспышки, для которых ускорение частиц имеет место, но плазма, помимо торможения ускоренных частиц, также нагревается и за счёт других механизмов; ранние импульсные вспышки, для которых не наблюдается преднагрева плазмы до импульсной нетепловой фазы. Несмотря на то, что во многих случаях прямой нагрев плазмы сосуществует с ускорением частиц [23], в литературе описаны события, где практически весь нагрев обусловлен только торможением частиц, т. е. эти события являются противоположностью плавным тепловым вспышкам. Такие вспышки, получившие название «холодных», являются подгруппой ранних импульсных вспышек и характеризуются очень слабым тепловым откликом относительно нетеплового излучения [24, 25, 26, 27].

В разделе 3.2 описан отбор ранних импульсных холодных вспышек на основании соотношения между нетепловым излучением, зарегистрированным в жёстком рентгеновском диапазоне *Konus-Wind* и тепловым излучением в мягком рентгеновском диапазоне по данным *GOES*. В качестве ранних импульсных были выбраны вспышки, для которых на момент триггера *Konus-Wind* не было зарегистрировано события в списке *GOES*¹. Выборка опорных вспышек была сформирована из вспышек, наблюдавшихся *Konus-Wind* в триггерном режиме и описанных во **Главе 2**.

¹Список событий *GOES* <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>

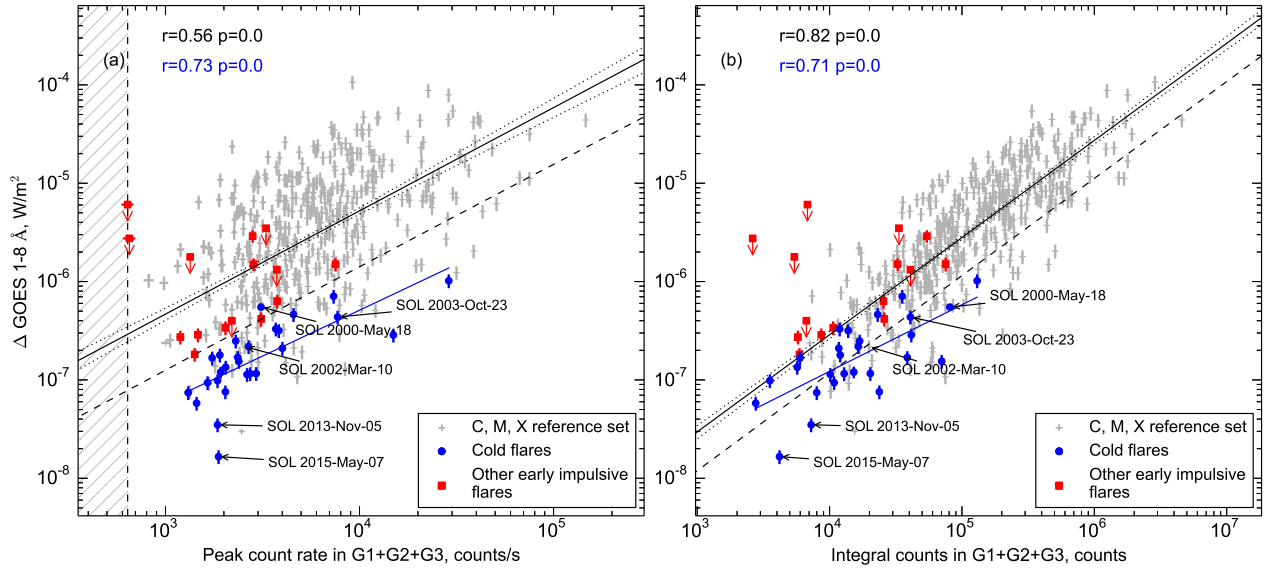


Рис. 2: Увеличение потока в канале $GOES\ 1-8\ \text{\AA}$ во время импульсной фазы вспышки, $\Delta GOES$ по сравнению с (а) ее пиковой скоростью счёта и (б) интегральным числом отсчётов. Черные и синие сплошные линии являются степенными зависимостями для всех вспышек (как ранних импульсных вспышек, так опорных) и только холодных вспышек соответственно, черные пунктирные линии отображают доверительный диапазон для всех вспышек 0,68. Черным и синим цветом указаны коэффициенты корреляции Пирсона (r) и значения вероятности случайной корреляции (p) для всех вспышек и только для холодных соответственно. Черная пунктирная линия представляет собой границу, которая выделяет «холодные» вспышки.

Далее для опорных вспышек и ранних импульсных вспышек были получены регрессии между (1) пиковой скоростью счёта *Konus-Wind*, которая даёт оценки нетеплового излучения, и приращением потока в канале $GOES\ 1-8\ \text{\AA}$, $\Delta GOES$, в течение импульсной фазы вспышки, которое отражает тепловой отклик плазмы; и (2) интегральным числом отсчётов *Konus-Wind* и $\Delta GOES$ (см. Рис. 2). Холодные вспышки были отобраны среди ранних импульсных по выполнению одного из двух критериев: либо (1) отношение между $\Delta GOES$ и пиковой скоростью счёта в жёстком рентгеновском диапазоне ниже, чем для большинства (84%) вспышек, либо (2) отношение между $\Delta GOES$ и интегральным числом отсчетов в жёстком рентгеновском диапазоне ниже, чем для большинства (84%) вспышек. Этот подход позволил выделить 27 холодных вспышек.

В Разделе 3.3 приведены положения холодных вспышек на диске Солнца: все холодные вспышки находятся на солнечном диске, кроме одной, для которой основание одной петли скрыто лимбом, таким образом, среди выборки холодных вспышек нет залимбовых вспышек, для которых низкий тепловой отклик можно было объяснить затенением солнечным лимбом.

Раздел 3.4 посвящён анализу холодных вспышек в жёстком рентгеновском и микроволновом диапазонах.

Сравнение длительностей холодных и опорных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне по данным *Konus-Wind* выявило, что холодные вспышки статистически значимо короче опорных, медиана распределения холодных вспышек составляет всего 8 с против 48 с для опорных. Спектральный ана-

лиз в диапазоне 20–1200 кэВ проводился на пиковых временных интервалах с использованием двух подходов: аппроксимация феноменологическими моделями, одностепенной и двухстепенной с изломом; и моделями толстой мишени [28], подразумевающей одностепенной и двухстепенной спектры ускоренных электронов. Сравнение полученных спектральных параметров между холодными и опорными вспышками показало, что холодные вспышки характеризуются более жёсткими фотонными спектрами, более жёсткими спектрами ускоренных электронов, а также меньшими фотонными потоками и потоками ускоренных электронов по сравнению со вспышками опорной группы.

В качестве опорной группы вспышек в микроволновом диапазоне были выбраны вспышки из статистического исследования [18] по данным OVSA. Для анализа холодных вспышек использовались данные всех доступных в этом диапазоне инструментов. Так же, как и в жёстком рентгеновском диапазоне, холодные вспышки характеризовались меньшими длительностями в микроволновом диапазоне (медиана для распределения холодных вспышек 16 с против медианы 108 с для опорных). Спектральный анализ проводился с использованием феноменологической модели гиротронного излучения, которая характеризуется пиковой плотностью потока S_{peak} на пиковой частоте f_{peak} и двумя степенными индексами α_{lf} в низкочастотном диапазоне и α_{hf} в высокочастотном диапазоне. Степенной индекс α_{hf} связан со степенным индексом электронов, ответственных за гиротронное излучение, в то время как α_{lf} определяется самопоглощением гиротронного излучения [29]. Поскольку спектральные параметры в микроволновом диапазоне могут существенно варьироваться в течение вспышки, фитирование проводилось на временном интервале 1 с. Для построения гистограмм распределений спектральных параметров сначала использовались все временные интервалы, потом, чтобы уменьшить влияние длительных событий на форму распределений, было выбрано пять временных интервалов для каждого всплеска – в начале, в середине фазы роста, в максимуме микроволнового всплеска, в середине фазы затухания и в конце всплеска. Построенные гистограммы показали, что холодные вспышки в среднем характеризуются намного большими пиковыми частотами, чем опорные: медианное значение 12.4 ГГц против 6.6 ГГц у опорных. Среди холодных вспышек выделяется группа вспышек с, напротив, низкими пиковыми частотами, около 2–3 ГГц. Холодные вспышки отличаются от опорных и меньшими (по модулю) α_{hf} , что подтверждает вывод о более жёстких спектрах ускоренных электронов, и большими α_{lf} , что свидетельствует о большей степени однородности источника в случае холодных вспышек [30].

В Разделе 3.5 обсуждаются результаты исследования, которые свидетельствуют, что холодные вспышки демонстрируют значительные отличия от опорных вспышек в своих временных и спектральных характеристиках в рентгеновском и микроволновом диапазонах. Проведённое исследование позволяет сделать вывод, что холодные вспышки в дальнейшем подразделяются на две группы: первая характеризуется высокими пиковыми частотами гиротронного спектра и ассоциируется с плотными компактными петлями с высоким магнитным полем, а вторая – низкими пиковыми частотами и с протяжёнными разреженными петлями.

Глава 4 посвящена построению физической модели холодной вспышки с задержкой нагрева, произошедшей 10 марта 2002 г. (2002-03-10) [A2]. В

Разделе 4.1 дан обзор других исследований отдельных холодных вспышек [25, 7].

В Разделе 4.2 приведены доступные для вспышки 2002-03-10 наблюдательные данные. Особенностью этого события являются импульсные временные профили в жёстком рентгеновском и микроволновом диапазоне на высоких частотах (17 и 35 ГГц), в то время как по мере уменьшения частоты профили микроволнового излучения становятся всё более плавными и всё более задержанными относительно импульсной фазы, при этом наиболее плавным и наиболее задержанным является временной профиль *GOES* (Рис. 3).

Изображения вспышечной области в ультрафиолетовом диапазоне по данным *SoHO/EIT* показывают два близкорасположенных источника, на микроволновых изображениях радиогелиографа NoRH виден высокочастотный источник 34 ГГц, расположение которого совпадает с одним из ультрафиолетовых источников, а также два источника на частоте 17 ГГц, один из которых совпадает с ультрафиолетовым источником, а второй отстоит на $\sim 80''$. В областях между ультрафиолетовыми и между микроволновыми источниками на 17 ГГц пролегают нейтральные линии магнитного поля.

Анализ спектральных данных *Konus-Wind* в жёстком рентгеновском диапазоне показал, что вспышка характеризуется жёсткими степенными индексами, а микроволновых наблюдений – сильную эволюцию параметров в течение вспышки: пиковая частота изменялась от ~ 35 ГГц во время импульсного пика до ~ 1.5 ГГц на фазе спада.

Совокупность наблюдательных данных свидетельствует о том, что во вспышку были вовлечены две петли – большая и малая, малая петля более плотная и с большим магнитным полем, а большая – разреженная, характеризующаяся меньшим магнитным полем.

Моделирование при помощи *GX Simulator* описано в Разделе 4.3. Оно подтвердило двухпетельную структуру вспышки, при которой магнитное пересоединение происходит из-за взаимодействия двух петель [31]. Ускоренные электроны распределились примерно поровну между двумя петлями, при этом электроны в малой петле были ответственны за импульсное излучение вспышки в жёстком рентгеновском диапазоне и за высокочастотное микроволновое излучение, а электроны, захваченные в магнитную ловушку в большой петле, породили задержанное низкочастотное излучение в микроволнах и задержанный по времени нагрев.

В Разделе 4.4 обсуждаются основные результаты, полученные для данной вспышки. Показано, что весь нагрев, наблюдаемый в мягком рентгеновском диапазоне *GOES* обусловлен медленным торможением ускоренных электронов, захваченных в большой петле, что и объясняет задержку нагрева. Таким образом, хотя эта вспышка и не демонстрирует феноменологического эффекта Ньюперта, а именно, корреляции между жёстким рентгеновским временным профилем и производной по времени профиля излучения в мягком рентгеновском диапазоне, нагрев плазмы обусловлен только ускоренными частицами, что находится в согласии с теоретическим эффектом Ньюперта.

В **Главе 5** излагаются исследования солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в гамма-диапазоне [A3, A4, A5].

Во Введении дан обзор механизмов, которые формируют спектр вспышечного излучения в области $\gtrsim 1$ МэВ: помимо тормозного излучения уско-

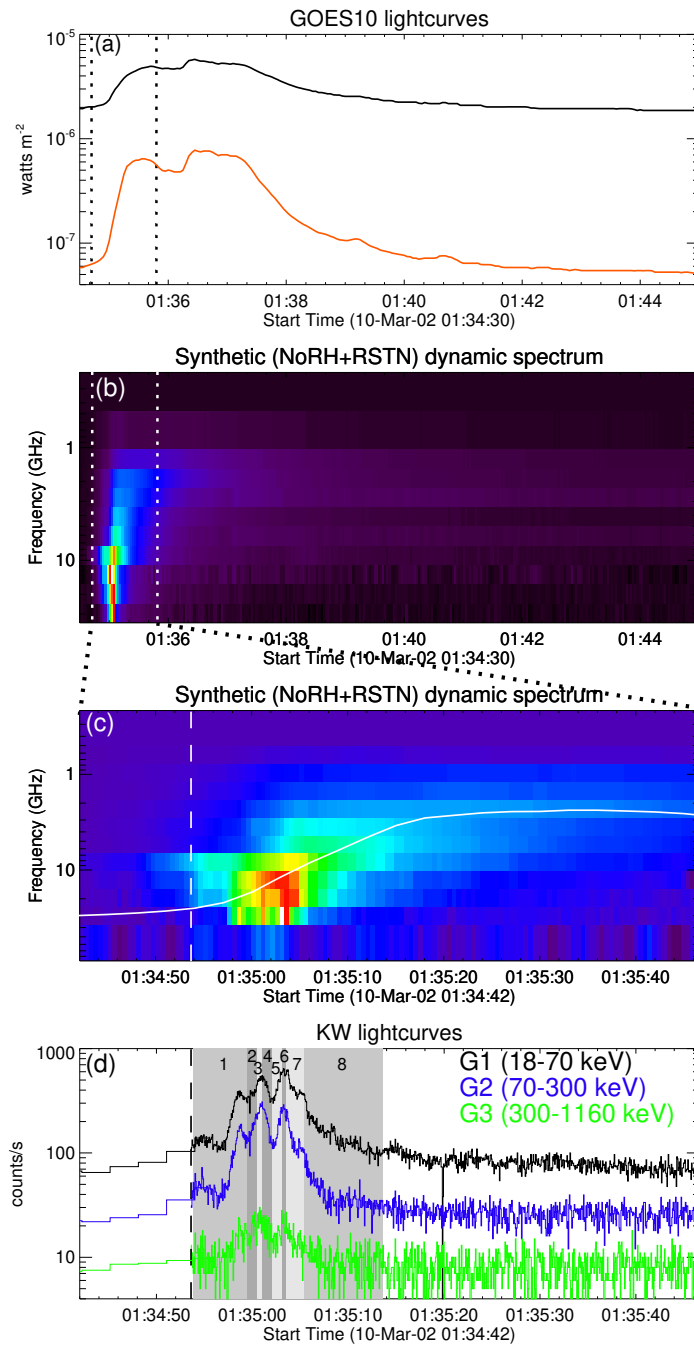


Рис. 3: Обзор солнечной вспышки SOL2002-03-10. (a) кривые блеска *GOES*. (b) микроволновый динамический спектр. (c) динамический спектр импульсной фазы вспышки в увеличенном масштабе. Белая сплошная кривая показывает временной профиль *GOES*. (d) кривые блеска *Konus-Wind* в трех энергетических диапазонах. Пунктирные вертикальные линии на панелях (c) и (d) показывают время начала триггерной записи *Konus-Wind*. Вертикальные темные или светло-серые полосы обозначают восемь временных интервалов, на которых проводилось фитирование спектров *Konus-Wind*.

ренных электронов вклад вносят ускоренные ионы за счёт многочисленных ядерных реакций, что порождает несколько спектральных компонентов. Среди этих компонентов стоит выделить гамма-линии снятия возбуждения ядер, излучение от аннигиляции позитронов и электронов, узкую линию на энергии 2.223 МэВ, связанную с захватом нейтрона протоном с образованием дейтерия, широкую линию на ~ 70 МэВ от распада нейтральных пионов и континуум от распада нейтральных и заряженных пионов [32, 33]. Поскольку за излучение в различных компонентах отвечают протоны различных энергий, соотношение между потоками в различных гамма-линиях позволяет судить о наклоне спектра ускоренных протонов [34, 35]. Часто в гамма-диапазоне наблюдается ещё один жёсткий компонент континуума, исчерпывающего объяснения для которого к настоящему времени не найдено [36, 37].

Раздел 5.2 посвящён исследованию гамма-излучения импульсной фазы вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г. (2017-09-06), которая стала самой мощной вспышкой прошедшего, 24 цикла солнечной активности и характеризовалась рекордно высоким значением коронального магнитного поля [38]. Её импульсная фаза пришлась на время, когда обсерватории *RHESSI* и *Fermi-GBM* находились в тени Земли, таким образом данные *Konus-Wind*, который наблюдал большую часть импульсной фазы в триггерном режиме, стали единственными доступными для исследования высокоэнергичного излучения. Временной профиль *Konus-Wind* в жёстком канале G2 (~ 80 –300 кэВ) представлен на Рис. 5(а), на рисунке пунктиром выделены 9 временных интервалов, для которых получены многоканальные спектры в гамма-диапазоне.

Излучение вспышек в гамма-диапазоне представляет собой суперпозицию нескольких перекрывающихся компонентов. Поскольку в общем случае определить наличие того или иного компонента в приборном спектре низкого энергетического разрешения методом наименьших квадратов нельзя, в работе использовался байесовский подход [39]. Байесовский анализ подтвердил наличие в спектре излучения линий снятия возбуждения ядер, аппроксимация которых проводилось единым шаблоном *nuclear* [40], излучения аннигиляции позитронов, в качестве модели для которого была выбрана гауссовская линия с центром на 511 кэВ, и линии захвата нейтрона – гауссовской линии на 2.223 МэВ. Поскольку в спектре присутствовал жёсткий компонент, континуум аппроксимировался двухстепенным законом, VPL, с изломом на энергии ~ 300 кэВ и степенным индексом в высокоэнергичной области γ_2 более жёстким, чем γ_1 в низкоэнергичной. Усреднённый во времени спектр вспышки представлен на Рис. 4. По соотношению между потоками в линиях снятия возбуждения ядер и линии захвата нейтрона и на основании моделирования [34] удалось оценить степенной индекс спектра ускоренных протонов, который составил $s = 4.01_{-0.19}^{+0.21}$. Отталкиваясь от степенного индекса и потока в линиях снятия возбуждения [41] была оценена энергия ускоренных во вспышке ионов как $E_{\text{ion}} \sim 11 \times 10^{30}$ эрг.

Динамика спектральных параметров, полученная из анализа на 9 временных интервалах, представлены на Рис. 5. В течение начальных двух пиков степенные индексы γ_1 и γ_2 близки, а начиная с $\sim 11:56:40$, γ_2 становится жёстче, в то время как γ_1 , напротив, – мягче. Панель (с) показывает, что излучение в высокоэнергичном континууме задержано относительно низкоэнергич-

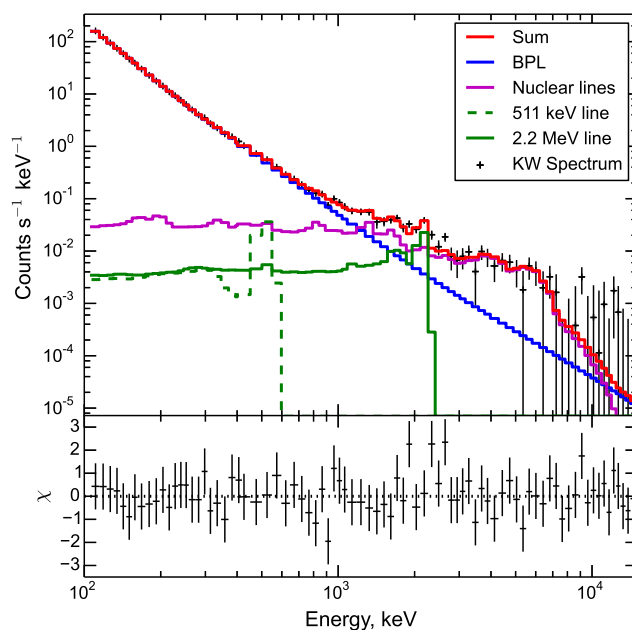


Рис. 4: Аппроксимация усреднённого по времени приборного спектра вспышки 2017-09-06 моделью BPL + nuclear + 511 кэВ + 2.223 МэВ. Цветовые соответствия компонентов приведены на панели. Данные *Konus-Wind* показаны с помощью символов, где горизонтальные чёрточки указывают на энергетический диапазон каждого канала, а вертикальные – на соответствующие статистические погрешности. На нижней панели отображаются невязки.

ного, и величина задержки составляет ~ 18 с. В работе предложено несколько возможных объяснений природы этого жёсткого компонента, а именно: наличие второй фазы ускорения для части ускоренных электронов; вклад от высокоэнергичных позитронов и электронов, рождённых при распаде заряженных пионов; формирование высокоэнергичной части континуума другим, отличным от тормозного, механизмом, например, обратным комптоновским рассеянием фотонов на высокоэнергичных электронах.

Интересной особенностью этой вспышки является маленькая задержка линии захвата нейтрона 2.223 МэВ относительно линий снятия возбуждения ядер, которая составляет всего ~ 11 с вместо характерных ~ 100 с [35]. Такая маленькая задержка может быть связана с резким уменьшением числа рождающихся в ядерных реакциях в ходе события нейтронов.

Число рождающихся нейтронов сильно зависит от наклона спектра ускоренных протонов и состава атмосферы [35], так что одной из возможных причин уменьшения числа нейтронов может служить то, что спектр протонов в течение вспышки становится более мягким. Это позволило оценить верхние пределы на степенной индекс спектра протонов в начале гамма-вспышки и нижние пределы на степенной индекс в конце наблюдений *Konus-Wind*. Эти пределы также нанесены на панель (b) Рис. 5. Эволюция степенного индекса протонов хорошо коррелирует с эволюцией степенного индекса континуума до излома (< 300 кэВ). Динамика потоков в спектральных компонентах гамма-излучения наряду с обнаруженной быстрой спектральной эволюцией ускоренных протонов позволили получить нижний предел для величины уско-

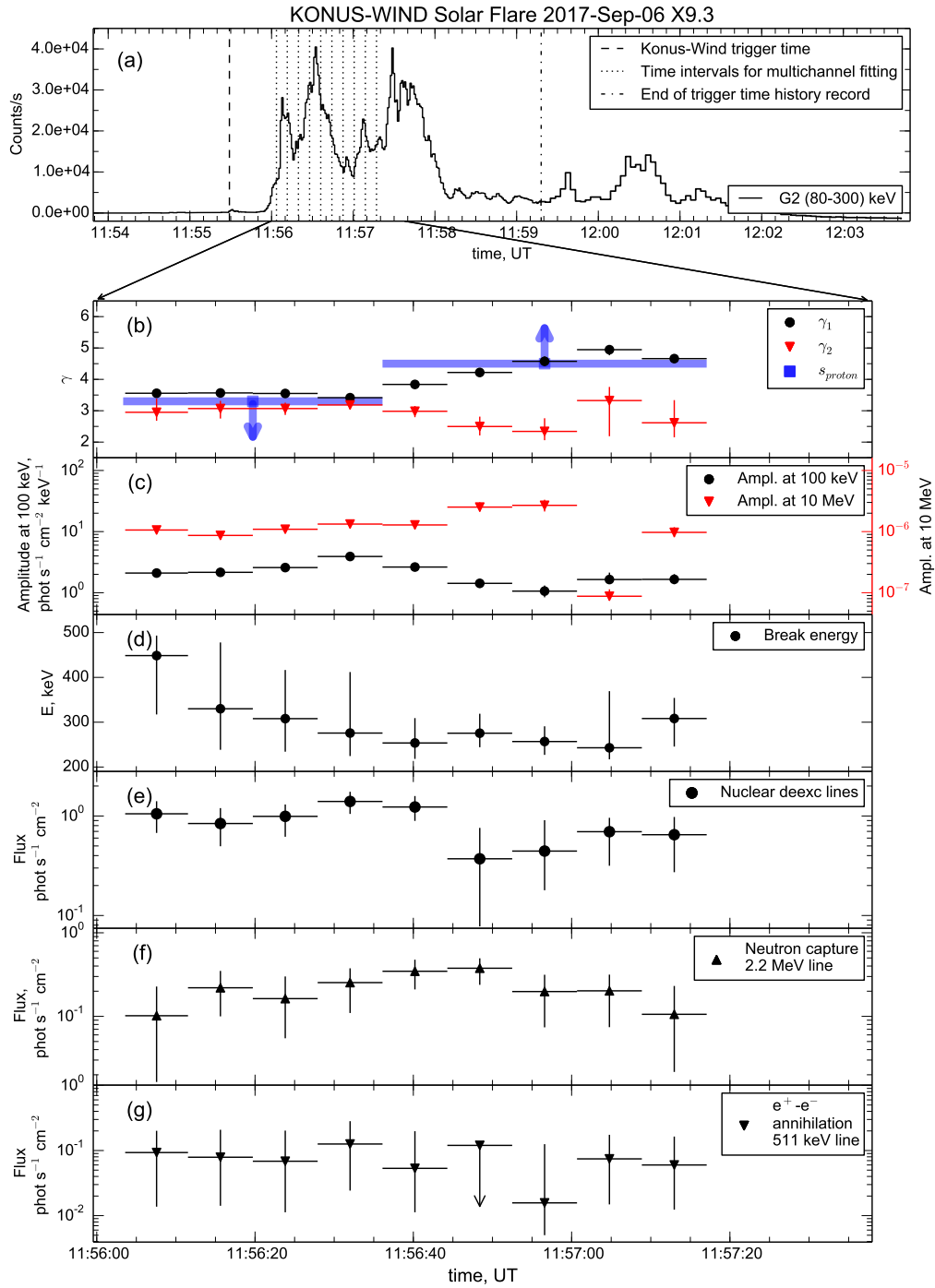


Рис. 5: Спектральная эволюция вспышки 2017-09-06 класса X9.3. (a) Временной профиль в канале G2, вертикальные пунктирные линии обозначают временные интервалы, используемые для фитирования многоканальных спектров; (b) временная эволюция степенных индексов фотонов при низких энергиях γ_1 (черные круги) и при более высоких энергиях γ_2 (красные треугольники), а также расчетные пределы для степенного индекса протонов s (синие квадраты); (c) амплитуды VPL на 100 кэВ (черные круги) и на 10 МэВ (красные треугольники); (d) энергия излома E_{break} для VPL; (e) поток в линиях снятия возбуждения ядер (шаблон nuclear); (f) поток в линии 2.223 МэВ; (g) поток в линии 511 кэВ.

ряющего электрического поля, который составил 0.3 В/м , и оценку размера области ускорения, равную $3 \times 10^9 \text{ см}$.

В Разделе 5.3 рассмотрена вспышка класса X2.4 9 июля 1996 г., которая интересна тем, что для неё впервые наблюдались фотосферные возмущения, солнетрясения [42]. Данную вспышку *Konus-Wind* наблюдал в гамма-диапазоне и она интересна для сравнения со вспышкой 2017-09-06. Спектр вспышки 1996-07-09, так же как и спектр 2017-09-06, содержал гамма-линии, связанные со снятием ядерного возбуждения, аннигиляцией позитронов и захватом нейтронов, но континуум согласовывался с одностепенной моделью, так что жёсткого компонента в этой вспышке не наблюдалось. Степенной индекс континуума γ , в отличие от вспышки 2017-09-06, практически не менялся с течением вспышки, сохраняя значение ~ 3.5 . Соотношение между временными профилями потока с линиях снятия ядерного возбуждения и линии захвата нейтрона 2.223 МэВ совместимо с предположением о слабом изменении индекса спектра протонов с течением вспышки, который был оценен как ~ 3.7 .

Раздел 5.4 посвящён совместным наблюдениям солнечных вспышек инструментом *Konus-Wind* и космическим экспериментом RAMELA, который работал с 2006 г. по 2016 г. на околоземной эллиптической орбите [43] и проводил измерения зарядов, жёсткостей и скоростей частиц в диапазоне энергий $\sim 0.1\text{-}1000 \text{ ГэВ}$, а также изотопного состава ядер от водорода до бора в энергетическом диапазоне $\sim 0.1\text{-}1 \text{ ГэВ/нуклон}$.

В течение 2006–2014 г. RAMELA измерила спектры солнечных космических лучей (СКЛ) от 28 солнечных вспышек [44], включая 14 вспышек, для которых были зарегистрированы фрагменты спектров рождённых во вспышках нейтронов [45]. За это же время *Konus-Wind* наблюдал 23 вспышки на энергиях выше 1 МэВ – области, где основной вклад в излучение вносят гамма-линии от реакций ускоренных ионов. Между списком из 28 вспышек, зарегистрированных RAMELA, и списком из 23 вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* на энергиях выше 1 МэВ , было только два пересечения – вспышка класса X1.1 2012-07-06, для которой RAMELA наблюдала протоны и нейтроны, и вспышка класса X4.9 2014-02-25, для которой наблюдались ускоренные протоны. Неожиданным результатом этой работы стало отсутствие в спектре вспышки 2012-07-06 линии захвата нейтрона 2.223 МэВ при наличии линий снятия возбуждения ядер и излучения аннигиляции позитронов, несмотря на то, что в межпланетном пространстве нейтроны от этой вспышки были зарегистрированы. Возможное объяснение отсутствия линии в спектре может объясняться высокой пучковой анизотропией рождённых нейтронов в направлении от поверхности Солнца.

В Разделе 5.4 обсуждаются результаты анализа вспышек с гамма-излучением, детектированных *Konus-Wind*. Одним из основных результатов является высокая корреляция между изменением степенного индекса спектра ускоренных протонов и степенного индекса континуума в сравнительно низкоэнергичном диапазоне, формируемом тормозным излучением электронов нерелятивистских и среднерелятивистских энергий, и антикорреляция со спектральной эволюцией континуума на больших энергиях.

В **Заключении** излагаются основные результаты работы.

1. Сформирована и обнародована база данных солнечных вспышек, зарегистрированных инструментом *Konus-Wind* в 1994-2020 гг. в триггерном режиме, которая включает временные профили и многоканальные спектры более чем 1000 вспышек.
2. Среди солнечных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме, на основании соотношений между потоками теплового излучения, регистрируемого инструментом *GOES* в мягком рентгеновском диапазоне, и нетеплового излучения в жёстком рентгеновском диапазоне, регистрируемого инструментом *Konus-Wind*, выявлено 27 холодных вспышек.
3. Для выборки холодных вспышек и опорных вспышек, зарегистрированных *Konus-Wind* в триггерном режиме, оценены временные и спектральные характеристики жёсткого рентгеновского излучения по данным *Konus-Wind*. Проведённый анализ показал, что холодные вспышки характеризуются намного меньшими длительностями, более жёсткими спектрами и меньшими потоками ускоренных электронов по сравнению с опорной группой.
4. Для выборки холодных вспышек оценены характеристики гиротронного спектра ускоренных электронов, которые сравнивались с характеристиками опорной группы вспышек из [18]. Так же, как и в жёстком рентгеновском диапазоне, холодные вспышки характеризуются меньшими длительностями в микроволновом диапазоне, но при сравнимых интенсивностях излучения. Холодные вспышки статистически значительно отличаются от опорных вспышек значениями пиковых частот гиротронного спектра: большинство вспышек характеризуются намного большими пиковыми частотами, чем опорные.
5. Сделан вывод о том, что холодные вспышки подразделяются на две группы: первая характеризуется высокими пиковыми частотами гиротронного спектра, что указывает на происхождение в плотных компактных петлях с высоким магнитным полем, а вторая – низкими пиковыми частотами, что свидетельствует о происхождении в протяжённых разреженных петлях.
6. Разработана физическая модель холодной вспышки с задержкой нагрева. Модель включает взаимодействие двух петель – большой, разреженной и с низким магнитным полем, и малой, плотной и с высоким магнитным полем, между которыми ускоренные во вспышке электроны делятся примерно поровну. Показано, что нагрев, наблюдаемый в мягком рентгеновском диапазоне инструментом *GOES* целиком обусловлен потерями энергии ускоренных электронов, захваченных в большой петле, что и объясняет задержку нагрева. Таким образом, хотя эта вспышка и не демонстрирует феноменологического эффекта Ньюперта, она согласуется с теоретическим эффектом Ньюперта [46], который предполагает нагрев плазмы ускоренными электронами, без привлечения других механизмов нагрева.

7. Исследована динамика гамма-излучения в течение импульсной фазы вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г. по данным *Konus-Wind*. Спектр вспышки содержит гамма-линии, которые свидетельствуют об ускорении ионов. В этой вспышке впервые оценена спектральная эволюция ускоренных протонов на временном масштабе менее 1 минуты (~ 30 с), которая коррелирует со спектральной эволюцией ускоренных электронов, ответственных за низкоэнергичную часть спектра (< 300 кэВ), спектр которых с течением вспышки становится более мягким. Динамика потоков в спектральных компонентах гамма-излучения наряду с обнаруженной быстрой спектральной эволюцией ускоренных протонов позволили получить нижний предел для величины ускоряющего электрического поля, который составил 0.3 В/м, и оценку размера области ускорения, равную 3×10^9 см.
8. Континуум излучения импульсной фазы вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г. демонстрирует излом на энергиях 300-500 кэВ, причём высокоэнергичная часть характеризовалась более жёсткими степенными индексами. Природа этого ужесточения спектра неясна. Впервые оценена задержка высокоэнергичной части континуума относительно низкоэнергичной, которая составляет 18 с. Эволюция высокоэнергичной части континуума, характеризуется ужесточением спектра с течением вспышки. Таким образом, можно предположить, что континуум состоит из двух компонентов, имеющих различную физическую природу.
9. Исследована спектральная эволюция вспышки класса X2.4 9 июля 1996 г. в гамма-диапазоне по данным *Konus-Wind*. Её спектр содержит гамма-линии, но, в отличие от вспышки 6 сентября 2017 г., не демонстрирует ужесточения континуума на высоких энергиях. Не найдено свидетельств быстрой эволюции спектра протонов в течение вспышки, что находится в согласии с поведением степенного индекса континуума, который тоже практически не меняется с течением вспышки.
10. Проведено фитирование спектра в гамма-диапазоне вспышки класса X1.1 6 июля 2012 г., для которой эксперимент PAMELA наблюдал протоны и нейтроны в межпланетном пространстве. Неожиданным результатом стало то, что в спектре вспышки содержались линии снятия возбуждения ядер и излучение аннигиляции позитронов, но не было обнаружено линии захвата нейтрона 2.223 МэВ. Возможное объяснение отсутствия линии в спектре может объясняться высокой пучковой анизотропией рождённых нейтронов в направлении от поверхности Солнца.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. A. L. Lysenko et al., Statistics of “Cold” Early Impulsive Solar Flares in X-Ray and Microwave Domains // *Astrophys. J.* 2018, Vol. 856, Issue 2, article id. 111;

- A2. G. D. Fleishman, . . . , A. L. Lysenko et al., A Cold Flare with Delayed Heating // *Astrophys. J.* 2016, Vol. 822, Issue 2, article id. 71;
- A3. A. L. Lysenko et al., Gamma-Ray Emission from the Impulsive Phase of the 2017 September 6 X9.3 Flare // *Astrophys. J.* 2019. Vol. 877, Issue 2, article id. 145;
- A4. A. L. Lysenko et al., Gamma-ray lines in solar flares with proton spectra measured by PAMELA experiment // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Volume 1400, Issue 2, article id. 022042;
- A5. А.Л. Лысенко и др., Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // *Успехи Физических Наук*, 2020, Том 190, Выпуск 8, стр. 878-894.

Благодарности

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, Григорию Давидовичу Флейшману, без которого это исследование было бы невозможно. Автор от души благодарит своих коллег по лаборатории Экспериментальной Астрофизики Дмитрия Сергеевича Свинкина, Дмитрия Дмитриевича Фредерикса, Михаила Владимировича Уланова, заведующего лабораторией Рафаила Львовича Аптекаря и сотрудников Института Солнечно-Земной Физики Александра Тимофеевича Алтынцева, Сергея Александровича Анфиногентова, Ларису Камалетдиновну Кашапову за их помощь, советы и поддержку.

Литература, цитируемая в автореферате

1. Aschwanden Markus J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions* (2nd edition). — 2005. — URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005psci.book.....A>.
2. Hurley K., Boggs S. E., Smith D. M. et al. An exceptionally bright flare from SGR 1806-20 and the origins of short-duration γ -ray bursts // *Nature*. — 2005. — Vol. 434, no. 7037. — P. 1098–1103.
3. Thompson C. A model of gamma-ray bursts. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 270. — P. 480–498.
4. Glesener Lindsay, Fleishman Gregory D. Electron Acceleration and Jet-facilitated Escape in an M-class Solar Flare on 2002 August 19 // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 867, no. 1. — P. 84.
5. Stefan John T., Kosovichev Alexander G. Estimation of Key Sunquake Parameters through Hydrodynamic Modeling and Cross-correlation Analysis // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 895, no. 1. — P. 65.
6. Li D., Kolotkov D. Y., Nakariakov V. M. et al. Quasi-periodic Pulsations of Gamma-Ray Emissions from a Solar Flare on 2017 September 6 // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 888, no. 2. — P. 53.
7. Motorina Galina G., Fleishman Gregory D., Kontar Eduard P. Spatiotemporal Energy Partitioning in a Nonthermally Dominated Two-loop Solar Flare // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 890, no. 1. — P. 75.

8. Aptekar R. L., Frederiks D. D., Golenetskii S. V. et al. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft // *Space Sci. Rev.* — 1995. — Feb. — Vol. 71, no. 1-4. — P. 265–272.
9. Arnaud K. A. XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by G. H. Jacoby, J. Barnes. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 1996. — P. 17.
10. Pascoe D. J., Anfinogentov S., Nisticò G. et al. Coronal loop seismology using damping of standing kink oscillations by mode coupling. II. additional physical effects and Bayesian analysis // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 600. — P. A78.
11. Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S. et al. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies // *Proceedings of the Research Institute of Atmospheric, Nagoya University.* — 1979. — Mar. — Vol. 26. — P. 129–132.
12. Hurford G. J., Read R. B., Zirin H. A Frequency Angle Interferometer for Solar Microwave Spectroscopy // *Sol. Phys.* — 1984. — Sep. — Vol. 94, no. 2. — P. 413–426.
13. Gary Dale E., Hurford G. J. Coronal Temperature, Density, and Magnetic Field Maps of a Solar Active Region Using the Owens Valley Solar Array // *Astrophys. J.* — 1994. — Jan. — Vol. 420. — P. 903.
14. Shramko A. D., Senik V. A., Tlatov A. G. Observations of March 29, 2006 solar eclipse in the radio range at wavelengths of 3.2 and 4.9 cm // *Cosmic Research.* — 2011. — Apr. — Vol. 49, no. 2. — P. 93–98.
15. Muratov A. A. 28 GHz Solar Spectropolarimeter // *XIIth Conference of Young Scientists.* — Vol. 365 of *Baikal Young Scientists' International School.* — 2011. — P. 85–87.
16. Zhdanov D. A., Zandanov V. G. Observations of Microwave Fine Structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope // *Sol. Phys.* — 2015. — Jan. — Vol. 290, no. 1. — P. 287–294.
17. Guidice D. A., Cliver E. W., Barron W. R., Kahler S. The Air Force RSTN System // *Bull. Am. Astron. Soc.* — Vol. 13. — 1981. — Mar. — P. 553.
18. Nita Gelu M., Gary Dale E., Lee Jeongwoo. Statistical Study of Two Years of Solar Flare Radio Spectra Obtained with the Owens Valley Solar Array // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 605, no. 1. — P. 528–545.
19. Lin R. P., Dennis B. R., Hurford G. J., et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Sol. Phys.* — 2002. — Vol. 210. — P. 3–32.
20. Nakajima H., Nishio M., Enome S. et al. The Nobeyama radioheliograph. // *IEEE Proceedings.* — 1994. — Vol. 82. — P. 705–713.
21. Domingo V., Fleck B., Poland A. I. The SOHO Mission: an Overview // *Sol. Phys.* — 1995. — Vol. 162, no. 1-2. — P. 1–37.
22. Nita Gelu M., Fleishman Gregory D., Kuznetsov Alexey A. et al. Three-dimensional Radio and X-Ray Modeling and Data Analysis Software: Revealing Flare Complexity // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 799, no. 2. — P. 236.
23. Veronig A., Vršnak B., Dennis B. R. et al. Investigation of the Neupert effect in solar flares. I. Statistical properties and the evaporation model // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Sep. — Vol. 392. — P. 699–712.
24. White S. M., Kundu M. R., Bastian T. S. et al. Multifrequency observations of a remarkable solar radio burst // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 384. — P. 656–664.

25. Bastian T. S., Fleishman G. D., Gary D. E. Radio Spectral Evolution of an X-Ray-poor Impulsive Solar Flare: Implications for Plasma Heating and Electron Acceleration // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 666. — P. 1256–1267.
26. Fleishman G. D., Kontar E. P., Nita G. M., Gary D. E. A Cold, Tenuous Solar Flare: Acceleration Without Heating // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 731. — P. L19.
27. Masuda S., Shimojo M., Kawate T. et al. Extremely Microwave-Rich Solar Flare Observed with Nobeyama Radioheliograph // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 2013. — Vol. 65. — P. 1.
28. Brown J. C. The Deduction of Energy Spectra of Non-Thermal Electrons in Flares from the Observed Dynamic Spectra of Hard X-Ray Bursts // *Sol. Phys.* — 1971. — Vol. 18. — P. 489–502.
29. Dulk G. A. Radio emission from the sun and stars. // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 23. — P. 169–224.
30. Fleishman G. D., Melnikov V. F. Gyrosynchrotron Emission from Anisotropic Electron Distributions // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 587, no. 2. — P. 823–835.
31. Hanaoka Yoichiro. Double-Loop Configuration of Solar Flares // *Sol. Phys.* — 1997. — Vol. 173, no. 2. — P. 319–346.
32. Ramaty R., Kozlovsky B., Lingenfelter R. E. Solar gamma rays // *Space Sci. Rev.* — 1975. — Vol. 18. — P. 341–388.
33. Vilmer N., MacKinnon A. L., Hurford G. J. Properties of Energetic Ions in the Solar Atmosphere from γ -Ray and Neutron Observations // *Space Sci. Rev.* — 2011. — Vol. 159. — P. 167–224.
34. Hua X.-M., Lingenfelter R. E. Solar flare neutron production and the angular dependence of the capture gamma-ray emission // *Sol. Phys.* — 1987. — Vol. 107. — P. 351–383.
35. Murphy R. J., Kozlovsky B., Share G. H. et al. Using Gamma-Ray and Neutron Emission to Determine Solar Flare Accelerated Particle Spectra and Composition and the Conditions within the Flare Magnetic Loop // *Astrophys. J. Suppl.* — 2007. — Vol. 168. — P. 167–194.
36. Petrosian V., McTiernan J. M., Marschhauser H. Gamma-ray emission and electron acceleration in solar flares // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 434. — P. 747–755.
37. Ackermann M., Ajello M., Allafort A. et al. Fermi Detection of γ -Ray Emission from the M2 Soft X-Ray Flare on 2010 June 12 // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 745. — P. 144.
38. Anfinogentov Sergey A., Stupishin Alexey G., Mysh'yakov Ivan I., Fleishman Gregory D. Record-breaking Coronal Magnetic Field in Solar Active Region 12673 // *Astrophys. J.* — 2019. — Aug. — Vol. 880, no. 2. — P. L29.
39. Protassov Rostislav, van Dyk David A., Connors Alanna et al. Statistics, Handle with Care: Detecting Multiple Model Components with the Likelihood Ratio Test // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 571, no. 1. — P. 545–559.
40. Murphy R. J., Kozlovsky B., Kiener J., Share G. H. Nuclear Gamma-Ray De-Excitation Lines and Continuum from Accelerated-Particle Interactions in Solar Flares // *Astrophys. J. Suppl.* — 2009. — Vol. 183. — P. 142–155.
41. Schwartz R. A., Csillaghy A., Tolbert A. K. et al. RHESSI Data Analysis Software: Rationale and Methods // *SoPh.* — 2002. — Vol. 210. — P. 165–191.
42. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. X-ray flare sparks quake inside Sun // *Nature.* — 1998. — Vol. 393, no. 6683. — P. 317–318.

43. Picozza P., Galper A. M., Castellini G. et al. PAMELA A payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics // *Astroparticle Physics*. — 2007. — Vol. 27. — P. 296–315.
44. Bruno A., Bazilevskaya G. A., Boezio M. et al. Solar Energetic Particle Events Observed by the PAMELA Mission // *ApJ*. — 2018. — Vol. 862. — P. 97.
45. Bogomolov E. A., Adriani O., Bazilevskaya G. A., et al. Spectra of Solar Neutrons with Energies of 10–1000 MeV in the PAMELA Experiment in the Flare Events of 2006–2015 // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* — 2017. — Vol. 81. — P. 132.
46. Veronig Astrid M., Brown John C., Dennis Brian R. et al. Physics of the Neupert Effect: Estimates of the Effects of Source Energy, Mass Transport, and Geometry Using RHESSI and GOES Data // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 621, no. 1. — P. 482–497.