

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Боровик Александр Васильевич

**СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ МАЛОЙ
МОЩНОСТИ В ЛИНИИ $H\alpha$**

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Филиппов Борис Петрович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Наговицын Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, заместитель директора по научной работе.

Слемзин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук 24.1.197.01, созданном при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://ru.iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

2



Ю.В. Ясюкевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Одним из фундаментальных вопросов солнечно-земной физики является вопрос о механизмах накопления и высвобождения энергии в солнечных вспышках. Повышенный интерес у исследователей всегда вызывали крупные мощные солнечные вспышки с энергией 10^{32} – 10^{33} эрг, оказывающие существенное влияние на радиационную обстановку в ближнем космосе, магнитосферу и ионосферу Земли, на работу космических аппаратов и систем связи. Такие события на Солнце относительно редки и происходят в основном на максимальной фазе солнечной активности. Хотя механизмы генерации мощных вспышек до конца еще не изучены, представление о таких вспышках довольно полное. Вместе с тем, как в активных, так и в спокойных областях Солнца происходит множество вспышек малой мощности с энергией $\sim 10^{29}$ эрг и площадью менее 2 кв. град., которые часто воспринимаются как фоновые события. По этой или другим причинам (например, из-за ограниченного разрешения наземных телескопов) системного комплексного исследования таких вспышек не проводилось. Но в последние десятилетия астрофизики все больше приходят к выводу, что активность Солнца обусловлена не только крупными событиями, но и структурами существенно меньшего масштаба. Предполагается, в частности, что вспышки малой мощности играют ключевую роль в нагреве солнечной короны. Отдельные исследования показывают также, что малые вспышки (МВ), отличаясь существенно по площади и мощности, проявляют сценарии развития, схожие с крупными вспышками. В этой связи, исследование вспышек малой мощности, их структуры и развития, пространственного и временного распределения по диску Солнца, а также геоэффективных проявлений составляет важное направление фундаментальных исследований.

Целью работы является исследование вспышечных процессов в относительно простом их проявлении. Полученные результаты позволят провести сравнительный анализ характеристик малых и крупных солнечных вспышек и прояснить вопрос: лежит ли в основе вспышек разной мощности единый физический механизм или они имеют разную природу.

Основные задачи диссертационной работы

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи.

1. Исследование статистических характеристик солнечных вспышек малой мощности в оптическом и рентгеновском диапазонах по данным международной Службы Солнца (1972–2017 гг.).

2. Изучение особенностей пространственного распределения вспышек малой мощности по поверхности Солнца.

3. Исследование пространственно-временных характеристик малых солнечных вспышек в активных областях (АО) с крупными мощными вспышками.

4. Разработка программных методов обработки фильмограмм. Изучение астроклиматических характеристик Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) ИСЗФ СО РАН и условий наблюдения тонкой структуры хромосферы и солнечных вспышек.

5. Исследование структуры и развития вспышек малой мощности по наблюдениям в линии $H\alpha$. Анализ эволюции активных областей, предвспышечных активизаций хромосферы, динамики магнитных полей во время вспышек малой мощности.

6. Интерпретация полученных результатов.

Методы научного исследования

В качестве методов исследования использовались:

- компьютерные программы в свободном доступе;
- методы статистического анализа экспериментальных данных;
- апробированные методы обработки изображений Солнца;
- аппаратно-программный комплекс (АПК), разработанный для БАО Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН);
- авторские специализированные пакеты программ.

Научная новизна

В работе с использованием наземных и космических наблюдений Солнца в оптическом и рентгеновском диапазонах получены новые данные о вспышках малой мощности. В результате решения поставленных задач дана новая интерпретация роли малых вспышек в общей структуре солнечной активности.

1. Впервые по данным Международной службы Солнца за 1972–2010 гг. (более 120000 вспышек) получены полные и статистически достоверные характеристики солнечных вспышек в линии $H\alpha$. Установлено, что более 90 % происходящих на Солнце вспышек относятся к вспышкам малой мощности, из которых самый многочисленный класс составляют вспышки балла SF (64 %).

2. Для всех классов площади, яркости и баллов оптических вспышек получены распределения энергии, временных параметров и мощности рентгеновского излучения, которые показывают существенное взаимное перекрытие. В результате в интервал энергий крупных солнечных вспышек

(оптические классы 2–4) попадает до 9.5 % вспышек малой мощности. Это свидетельствует, что энергия малых вспышек может быть сопоставима с энергией крупных солнечных вспышек.

3. Впервые определены характеристики солнечных вспышек семи типов: взрывного; внепятенных; двухленточных; с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области; с двумя и более центрами; с неоднократными всплесками интенсивности; сопровождающихся высокоскоростными темными волокнами.

4. Для малых вспышек обнаружена высокая корреляция между временем подъема яркости к максимуму и продолжительностью. Получены свидетельства того, что на Солнце существует категория малых вспышек, у которых относительное время подъема (отношение времени подъема к продолжительности) носит дискретный характер.

5. Установлено, что вспышки малой мощности, как и крупные мощные вспышки, могут сопровождаться потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности (в том числе класса X). С высокой и почти равной вероятностью малые вспышки сопровождаются рентгеновским излучением классов C и M, в отдельных случаях — класса X. Независимо от площади вспышек, рентгеновское излучение появляется в среднем на две минуты раньше оптического и достигает максимума у малых вспышек и вспышек класса 1 примерно на одну минуту позже максимума оптического излучения, у вспышек классов 2–4 — на две минуты позже.

6. Установлено, что в областях Солнца, где происходят интенсивные выходы магнитных потоков, малые вспышки возникают значительно чаще и образуют плотные скопления (ЦВА — центры вспышечной активности).

7. Обнаружено, что малые вспышки почти не встречаются на участках АО, где возникают и развиваются крупные солнечные вспышки. За несколько десятков минут (или часов) перед крупной вспышкой активность малых вспышек снижается или прекращается вовсе, что может являться одним из условий накопления магнитным полем АО энергии для мощной вспышки.

8. Показана тесная связь малых вспышек с границами хромосферной и магнитной сеток активных и спокойных областей Солнца. Установлено, что структура АО содержит широкий спектр масштабов конвективных ячеек — от мезогранул до супергранул и больше.

9. Обнаружено, что вспышки малой мощности возникают вблизи локальных короткоживущих мелкомасштабных линий раздела полярности продольного магнитного поля (ЛЛРП), которые образуются в АО во время всплытия новых магнитных потоков и их сближения с полями противоположной полярности. Это приводит к росту градиента магнитного поля до значений 1.3–1.5 Гс/км и

сдвиговым напряжениям поля на отдельных участках ЛЛРП в области малых вспышек. Аналогичное явление обнаружено у крупных мощных вспышек. В этом случае градиент магнитного поля на отдельном участке ЛРП достигал 3–3.5 Гс/км. Это показывает, что механизмы возникновения малых и крупных солнечных вспышек могут принципиально не отличаться.

10. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что вспышки малой мощности с точки зрения особенностей развития в линии $H\alpha$ не отличаются от крупных солнечных вспышек. Они, как и мощные вспышки, возникают вблизи ЛРП, сопровождаются активизациями и исчезновением волокон, могут иметь взрывной характер развития, сопровождаться неоднократными всплесками интенсивности. Среди малых вспышек встречаются вспышки, покрывающие тени солнечных пятен, двухленточные и белые вспышки.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные в процессе работы методы обработки наблюдательных данных и компьютерные программы существенно повышают эффективность исследований и могут быть использованы для исследования вспышечных процессов в разных диапазонах длин волн, а также для решения других задач солнечно-земной физики. Полученные результаты расширяют наши знания о нестационарных процессах на Солнце и могут использоваться для прогноза солнечной активности и построения физических моделей солнечных вспышек.

Соответствие паспорту специальности

Задачи диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия (физико-математические науки) в части пункта 10: Физика Солнца и солнечной активности.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обусловлена использованием большого объема наблюдательных данных, собственного наблюдательного материала и современных методов обработки. Изложенные в диссертации результаты обсуждались на семинарах отдела физики Солнца ИСЗФ СО РАН, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в ведущих рецензируемых российских и международных журналах.

Личный вклад автора

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор внес определяющий вклад в постановку задач и разработку научных принципов исследования. Автором самостоятельно изучена связь малых вспышек с хромосферными структурами, определены характеристики предвспышечных активизаций, изучены особенности развития малых вспышек в активных областях с крупными мощными вспышками, в комплексе активности в мае 1981 г., активной области СД № 135 в июне 1984 г. Самостоятельно изучен вопрос о пространственно-временной группировке вспышек малой мощности в ЦВА. Автором разработаны новые принципы построения световых кривых солнечных вспышек в линии $H\alpha$ и метод обнаружения на Солнце очагов повышенной активности вспышек малой мощности. В соавторстве автор выполнял существенную часть исследований, участвовал в обсуждении и интерпретации полученных результатов. В работе автор использовал наблюдательные материалы, полученные им и его коллегами на хромосферном телескопе полного диска Солнца Байкальской астрофизической обсерватории.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах отдела физики Солнца и докладывались на следующих конференциях, симпозиумах и совещаниях: Консультативное совещание КАПГ по физике Солнца (Чехословакия, 1986); Всесоюзная конференция по физике Солнца (Алма-Ата, 1987); XIII Консультативное совещание КАПГ по физике Солнца (Одесса, 1988); XXVII пленарное совещание COSPAR (Финляндия, 1988); V симпозиум КАПГ (Самарканд, 1989); Всесоюзная конференция по физике Солнца (Ашхабад, 1990); Совещания рабочей группы «Активное Солнце» (Москва, 1982; Звенигород, 1983; Пулково, 1988, 1990; Киев, 1990); I Советско-Китайский семинар по физике Солнца (Иркутск, 1991); IAU Colloquium. “New perspectives on Solar Prominences” (1997, France); Всероссийская конференция «Современные проблемы солнечной цикличности» (Санкт-Петербург, 1997); Всероссийская конференция «Гео- и гелиофизические исследования» (Иркутск, 1998); Всероссийская конференция «Взаимодействие излучений с веществом» (Иркутск, 1999); Международная конференция «Структура и динамика солнечной короны» (Троицк, 1999); Всероссийская конференция «Физика больших природных систем» (Иркутск, 2000); Всероссийская конференция «Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии» (Санкт-Петербург, 2000); Всероссийская конференция «Солнечная активность и ее земные проявления» (Иркутск, 2000); Всероссийская конференция «Астрофизика и физика микромира» (Иркутск, 2002); 10th European

Solar Physics Meeting “Solar Variability: From Core to Outer Frontiers” (Prague, 2002); Всероссийская конференция «Геология, геохимия и геофизика на рубеже 20–21 веков» (Иркутск, 2002); IAU Colloquium 188 “Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere” (Greece, 2002); Всероссийская конференция «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности» (Нижний Новгород, 2003); Всероссийская конференция «Magnetic Field and Three-Dimension Structure of the Solar Atmosphere» (Иркутск, 2003); IAU Symposium 223 “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity” (St. Petersburg, 2004); III Всероссийская астрономическая конференция «Горизонты Вселенной» (Москва, 2004); Всероссийская конференция по солнечно-земной физике (Иркутск, 2004); Coimbra Solar Physics Meeting: The Physics of Chromospheric Plasmas (Portugal, 2006); Всероссийская конференция по физике Солнца (Иркутск, 2009); Всероссийская конференция «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика» (Санкт-Петербург, 2009); Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика» (Иркутск, 2010); III Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля» (Иркутск, 2011); XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2011); IX Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике (Иркутск, 2011); Всероссийская конференция по физике Солнца (Санкт-Петербург, 2012); Всероссийская конференция по солнечно-земной физике (Иркутск, 2013); XIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Барнаул, 2013); «12th Sino-Russia Workshop of Space Weather» (China, 2014); XXI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2015); Международная конференция «Физика Солнца: теория и наблюдения» (КрАО, 2015); Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля» (Иркутск, 2016); XII Российско-Монгольская международная конференция по астрономии и геофизике (Иркутск, 2018); XIII Российско-монгольская международная конференция по астрономии и геофизике (Иркутск, 2019); Международная научная конференция «Россия и Монголия: результаты и перспективы научного сотрудничества» (Иркутск, 2022); Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца – 2022» (КрАО, Крым); Международная научная конференция «Россия и Монголия: результаты и перспективы научного сотрудничества» (Иркутск, 2023); Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца – 2023» (КрАО, Крым).

Положения, выносимые на защиту

1. Для оптических солнечных вспышек всех классов площади, яркости и баллов получены полные и статистически достоверные данные о продолжительности и длительности фаз. Впервые определены параметры

солнечных вспышек семи типов: взрывного; внепятенных; двухленточных; с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области; с двумя и более центрами; с неоднократными всплесками интенсивности; сопровождающихся высокоскоростными темными волокнами. Для вспышек малой мощности обнаружена высокая корреляция между временем подъема яркости к максимуму и продолжительностью. Показано, что малые вспышки, как и крупные мощные вспышки, могут сопровождаться потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности, в том числе класса X. Установлено, что независимо от площади H α -вспышек рентгеновское излучение возникает в среднем на две минуты раньше оптического и достигает максимума у малых вспышек и вспышек класса 1 примерно на одну минуту позже максимума оптического излучения, у вспышек классов 2–4 — на две минуты позже.

2. Установлено, что на диске Солнца вспышки малой мощности в местах интенсивного выхода магнитных потоков образуют плотные скопления. На участках АО, где развиваются крупные солнечные вспышки, малые вспышки почти не встречаются. За несколько десятков минут (или часов) перед крупной вспышкой активность малых вспышек снижается или прекращается вовсе, что может являться условием накопления магнитным полем АО энергии для крупной вспышки.

3. Обнаружена тесная связь малых вспышек с границами хромосферной и магнитной сеток активных и спокойных областей Солнца, с мелкомасштабными магнитными полями, локальными короткоживущими линиями раздела полярности продольного магнитного поля.

4. Установлено, что вспышки малой мощности с точки зрения особенностей развития не отличаются от крупных вспышек. Им, как и мощным вспышкам, предшествуют активизации и исчезновения волокон. Они могут также появляться в АО над тенью солнечных пятен, иметь взрывную фазу и неоднократные всплески интенсивности. Среди них встречаются двухленточные, внепятенные и белые вспышки.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 52 научных работах, включая 27 статей, входящих в перечень научных журналов, утвержденных ВАК для публикации научных результатов диссертаций, и в рецензируемых журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования (в том числе 22 статьи RSCI категории K1 и K2). Одна работа опубликована в коллективной монографии, 24 — в прочих научных изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 322 страницы текста, 191 рисунок, 38 таблиц и список цитируемой литературы из 280 наименований.

Краткое содержание диссертации

Введение. Представлена общая характеристика диссертации. Обоснована актуальность темы исследования. Изложены цель и задачи, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и публикациях по теме исследования.

Глава 1 содержит литературный обзор основных результатов исследования солнечных вспышек, а также теоретические работы, объясняющие их природу.

Глава 2 посвящена статистическому исследованию характеристик солнечных вспышек в линии $H\alpha$ и рентгеновском диапазоне по данным Международного вспышечного патруля и спутников GOES за 1972–2017 гг.

В **Разделе 2.1** приводится краткое описание базы данных солнечных вспышек, сформированной из разных источников и содержащей параметры 123906 солнечных вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Каталоги вспышек опубликованы в Мировом центре данных РАН: Боровик А.В., Жданов А.А. Мировой центр данных РАН. Каталоги солнечных вспышечных событий в линии $H\alpha$.

1. 1972–2017: DOI: <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-04>

2. 2018–2023: DOI: <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-05>

В **Разделе 2.2** рассмотрено распределение вспышек на Солнце по площади, яркости и баллам. Такое исследование было выполнено в 1972 г. в работе [Mitra et al., 1972] по характеристикам 8230 вспышек. В 2001 г. аналогичное исследование для отдельных классов вспышек повторили авторы работы [Temmer et al., 2001]. С тех пор подробных статистических исследований вспышек не проводилось.

Для статистического анализа солнечные вспышки из сформированной базы данных были подвергнуты селекции. Из-за возможных ошибок в определении класса площади вспышки вблизи солнечного лимба не рассматривались вспышки классов S и 1, произошедшие дальше 65° от центрального меридиана и вспышки, наблюдаемые при плохом качестве изображения и визуально [Solar Geophys. Data, 1983]. В групповых сообщениях станций об одной и той же вспышке усредненные данные не использовались. К группам были применены те же самые критерии отбора. Из оставшихся станций предпочтение отдавалось той, которая в базе данных имела более высокий уровень по числу сообщений. В результате общее количество вспышек сократилось до 98225, из которых 88518 имели класс

площади S (вспышки малой мощности), 8012 относились к классу 1, 1509 — к классу 2 и 186 — к классам 3 и 4.

Полученные распределения вспышек по площади, яркости и баллам показали существенные отличия от полученных ранее (рис. 1). Согласно результатам Митра и др. (штриховая линия на рис. 1) на Солнце преобладают вспышки балла SN (47.4 %). Присутствует также значимый пик для вспышек балла 1N (9.7 %) и небольшое превышение числа вспышек для баллов 2B (1 %) и (3–4)B (0.11 %). Из результатов выполненного нами статистического анализа следует, что подавляющее большинство происходящих на Солнце вспышек (более 90 %) относится к вспышкам малой мощности, из которых самый многочисленный класс составляют вспышки балла SF (64 %). Распределение имеет плавный спад без существенных отклонений.

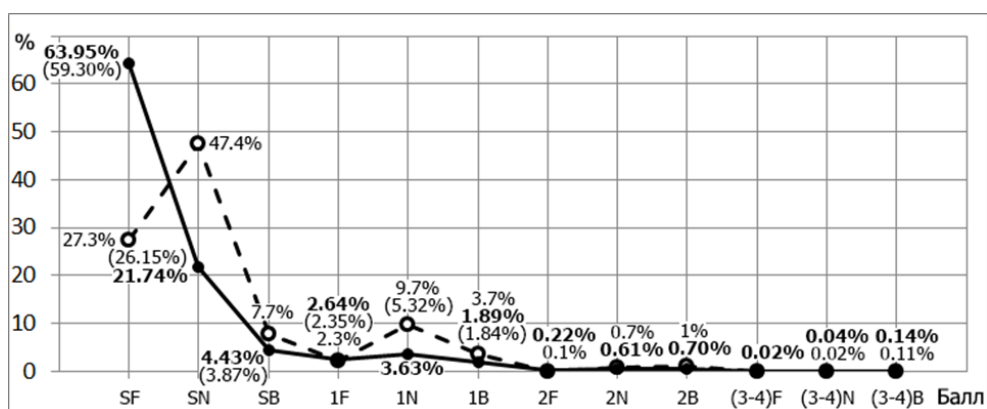


Рисунок 1. Распределение солнечных вспышек по баллам. Распределение Митра и др. показано штриховой линией, данные Теммер и др. взяты в скобки. Распределение и данные, полученные нами, показаны широкой сплошной линией и жирным шрифтом.

Превышение числа вспышек баллов SN и 1N на распределениях Митра и др., по всей вероятности, можно объяснить недостаточной статистикой.

В Разделе 2.3 рассматриваются временные характеристики солнечных вспышек: время подъема яркости к максимуму, время спада, продолжительность. Для всех классов площади и баллов вспышек получены распределения и их статистические характеристики. Оценены дисперсия, доверительные интервалы и др. Статистический анализ выполнен по данным всех патрульных станций и отдельно по данным обсерваторий HOLL (Holloman Solar Observatory, база ВВС, Нью-Мексико, США), LEAR (Learmonth Solar Observatory, Австралия) и RAMY (Ramey Solar Observatory, Пуэрто-Рико), использующих для наблюдений идентичные вакуумированные 25-см рефракторы. В качестве примера на рис. 2 показано распределение вспышек по продолжительности.

Установлено, что 94.6 % солнечных вспышек имеют продолжительность менее 1 ч, 5.4 % существуют значительно дольше. При этом 90% последних могут существовать от 1 до 3.3 ч. Максимальные значения продолжительности для вспышек классов S и 1 составляют 9.2 и 11.7 ч соответственно, для крупных вспышек (классы 2–4) — 8.3 ч. В редких случаях продолжительность вспышек приближается к 12 ч.

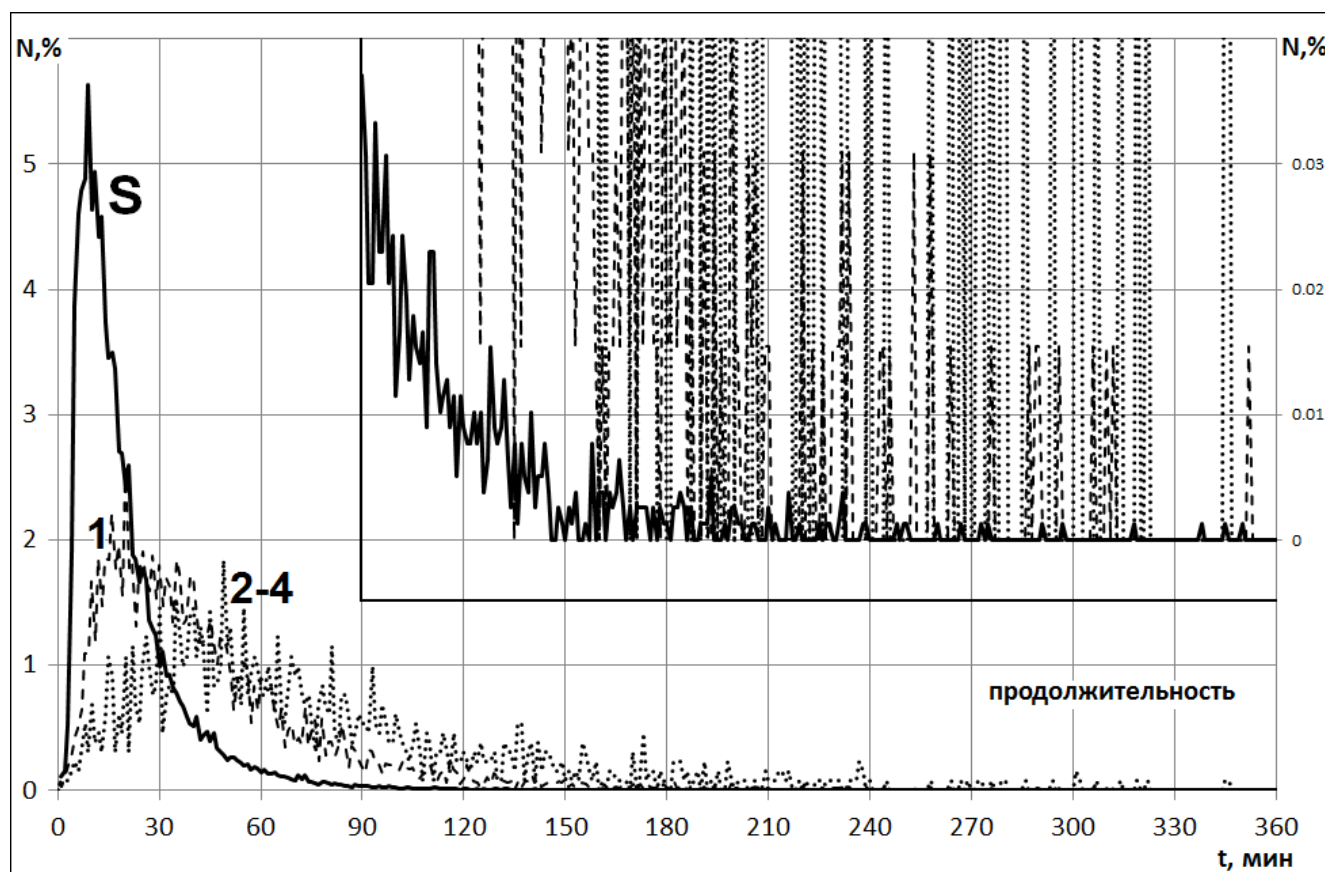


Рисунок 2. Распределение продолжительности солнечных вспышек в классах: S — сплошная линия, 1 — штриховая, 2–4 — пунктирная. В увеличенном масштабе показаны хвосты распределений (ось справа).

Подтвержден известный факт — с увеличением площади проявляется тенденция к возрастанию средних временных параметров солнечных вспышек. Однако, как показал статистический анализ, коэффициент корреляции между площадью и временными характеристиками вспышек не превышает 0.2–0.3. Присутствует также существенное взаимное перекрытие распределений, в результате которого в пределы временного интервала продолжительности 90 % малых вспышек ($\Delta t = 1 \div 38$ мин) попадает 25.5 % крупных вспышек и 53.8 % вспышек класса площади 1 (рис. 2).

Новые характеристики вспышек в большинстве случаев отличаются от полученных ранее. Одна из наиболее вероятных причин — недостаточный объем

данных, используемый авторами для статистического анализа. Это позволяет считать на сегодняшний день полученные уточненные характеристики солнечных вспышек наиболее полными и достоверными. Они могут использоваться для оценки физических параметров солнечных вспышек и построения моделей.

В Таблице 1, сформированной по данным работ [Смит, Смит, 1966; Temmer et al., 2001], скорректированной и дополненной новыми результатами, приведены средние продолжительности солнечных вспышек.

Таблица 1. Средняя продолжительность солнечных вспышек

Авторы	Период	Кол-во вспышек	Средняя продолжительность						Σ
			1-5	1	2	3	3+	2, 3, 3+ 2-4	
Newton & Barton (1973) ¹	1935-1936	—	—	—	—	—	—	—	20.0-40.0
Waldmeier (1938)	1935-1937	357	—	21	38	61	—	—	27
Giovanelli (1948)	1937-1938	24	—	—	—	—	—	—	30
Waldmeier (1948)	1935-1344	927	—	20.3	33.4	62.4	—	—	24.8
Ellison (1949)	1935-1947	109	—	17	29	62	≈180	—	—
Warwick (1954)	1951-1953	357	31	60			—	—	40
Dodson et al. (1956) ²	1949-1952	194	28	43	66	84		—	—
Waldmeier & Bachmann (1959)	1945-1954	1604	—	22.1	44.8	84.9	—	—	28.1
Smith H. & Smith E. (1966) ³	1957-1958	—	16.8	32.2	68.8	146	—	—	39.4
Reid (1968)	1958-1965	2907	16.5	28.2	—	—	—	60.5	—
Ružičková-Topolová (1974) ⁴	1957-1965	661	—	—	71.3	130	305	—	—
Wilson (1983)	1980	1348	—	—	—	—	—	—	29.8
Antalová (1985)	1970-1974	460	27	55	78	—	—	—	—
	1975-1979	561	30	51	78	201	—	—	—
Wilson (1987)	1975	850	16.6	38.7	62.7	—	—	—	18.1
Barlas & Atlaş (1992) ⁵	1947-1990	3569	24	38	—	—	—	78	—
Borovik & Zhdanov (2018) ⁵	1972-2010	577	21.7	37.3	—	—	—	71.8	24.2
Temmer at al. (2001)	1975-1999	75739	18.9	35.7	66.3	116	—	—	20.6
Borovik & Zhdanov (2018)	1972-2010	85968	18.9	44.7	72.8	107	85.6	76	21.7

Пояснение к таблице 1: В верхней строке таблицы (в графе «средняя продолжительность») указаны классы вспышек по первой международной классификации На-вспышек 1956 года, ниже — 1966 года.

¹ Меньшее по величине число относится к менее интенсивным вспышкам, большее — к более интенсивным (столбец Σ).

² Продолжительность рассчитана по фотометрическим кривым вспышек.

³ Данные получены по результатам МГГ.

⁴ Рассмотрены только крупные солнечные вспышки.

⁵ Рассмотрены только внепятенные солнечные вспышки.

Раздел 2.4 содержит результаты исследования характеристик семи типов вспышек: взрывного типа; внепятенных; двухленточных; с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области; с двумя и более центрами; с

неоднократными всплесками интенсивности; сопровождающихся высокоскоростными темными волокнами [Solar Geophys. Data, 1983]. Полученные данные (Таблица 2) свидетельствуют о связи временных параметров вспышек с особенностями их развития:

- **D** — внутри вспышечной области имеется один центр повышенной яркости;
- **E** — два или более ярких центра;
- **G** — внепятенная вспышка (солнечные пятна отсутствуют);
- **H** — вспышка сопровождается высокоскоростным темным волокном (flare accompanied by high-speed dark filament);
- **K** — вспышка показывает несколько всплесков интенсивности;
- **L** — наблюдается внезапная активизация волокон;
- **M** — вспышка наблюдается в континууме (белая вспышка);
- **R** — асимметрия в линии $H\alpha$ предполагает высокоскоростной выброс масс;
- **S** — вспышка возникла на месте исчезнувшего волокна;
- **U** — двухленточная вспышка (наблюдаются две яркие ленты, параллельные или сходящиеся);
- **V** — вспышка взрывного типа (в течение ~ 1 мин происходит значительный рост площади, сопровождаемый увеличением яркости вспышки);
- **W** — площадь вспышки продолжает увеличиваться после достижения максимума яркости;
- **Z** — вспышка покрывает тень пятна.

Этим, по-видимому, объясняется широкий размах временных параметров вспышек и взаимное перекрытие распределений (рис. 2).

Таблица 2. Средние временные параметры солнечных вспышек семи типов

тип	класс S					класс 1					классы 2-4				
	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	Δt	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	Δt	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	Δt
D	3445	15.2 ± 0.4	7	11	1 - 30	227	27.7 ± 3.4	10	18	1 - 58	31	65.1 ± 17.5	41	51	1 - 114
V	2943	19.1 ± 0.5	10	15	1 - 36	286	44.7 ± 4.2	25	34	1 - 91	53	83.2 ± 15.5	50	65	1 - 173
H	2370	19.3 ± 0.7	8	14	1 - 40	436	38.8 ± 2.6	19	32	1 - 74	128	65.0 ± 7.2	52	56	1 - 119
G	498	21.7 ± 1.5	12	17	1 - 42	73	37.3 ± 8.1	10	27	1 - 80	6	71.8 ± 29.1	79	77	1 - 128
E	7009	22.5 ± 0.5	10	17	1 - 45	1527	40.9 ± 1.5	20	32	1 - 80	234	68.6 ± 6.3	40	54	1 - 137
U	574	32.7 ± 2.0	8	26	1 - 64	440	63.7 ± 3.9	31	55	1 - 118	229	109.1 ± 8.0	87	93	1 - 199
K	1034	46.0 ± 2.1	24	38	1 - 85	309	72.8 ± 5.6	33	58	1 - 144	98	97.2 ± 10.9	70	78	1 - 173
	78204	18.9 ± 0.1	8	14	1 - 38	6461	44.7 ± 0.8	20	36	1 - 87	1303	76.0 ± 0.3	49	61	1 - 149

Результаты статистического анализа показывают также, что вспышки малой мощности в линии $H\alpha$ с точки зрения особенностей развития не отличаются от крупных солнечных вспышек (рис. 3).

Они, как и мощные вспышки, сопровождаются активизациями и исчезновением волокон (L, S, H), в активных областях могут появляться над тенью солнечных пятен (Z), могут иметь взрывную фазу (V) и несколько всплесков интенсивности (K). Среди них встречаются двухленточные вспышки (U) и внепятенные вспышки (G). Даже редко наблюдаемые белые вспышки (M), сопровождаемые мощным жестким рентгеновским и микроволновым излучением, могут иметь очень низкий оптический балл.

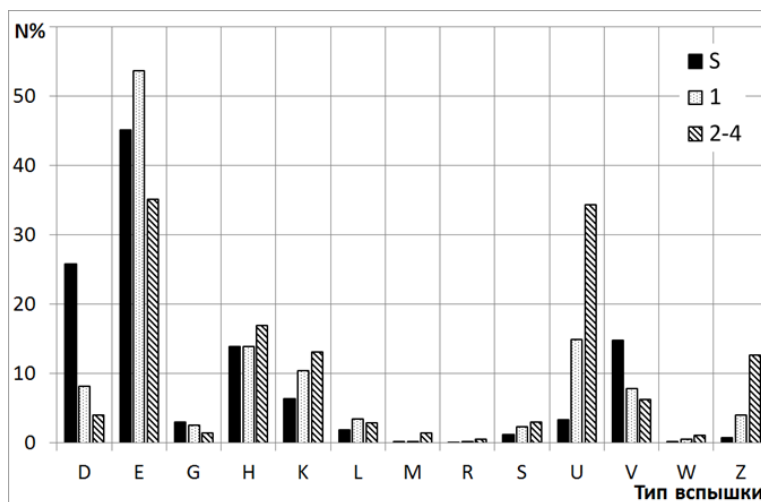


Рисунок 3. Частота встречаемости вспышек различных типов в классах площади S, 1 и 2–4. Количество вспышек: 20025, 3701 и 902 соответственно.

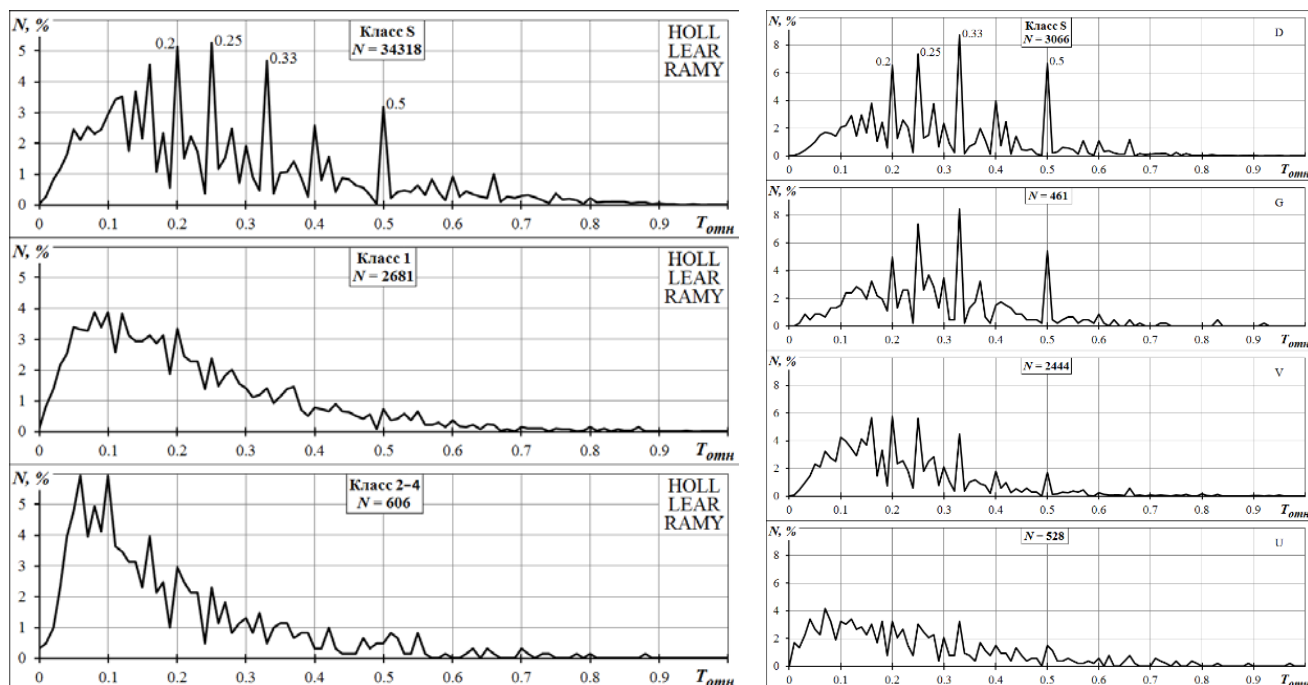


Рисунок 4. Распределение относительного времени подъема солнечных вспышек классов площади S, 1, 2–4 по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMU для отдельных типов вспышек.

Обнаружена высокая корреляция между временем подъема яркости малых вспышек к максимуму и их продолжительностью, а также дискретность относительного времени подъема — присутствие на распределениях $T_{\text{отн}}$ ряда максимумов: 0.2, 0.25, 0.33 и 0.5 (рис. 4). С ростом площади и балла вспышек максимумы слабеют, сглаживаются и фактически полностью исчезают у крупных вспышек. Те же максимумы присутствуют и на распределениях малых вспышек типов D и G. На распределениях вспышек типов V, H и E они постепенно сокращаются и полностью исчезают у двухленточных (U) и K-вспышек. Это показывает, что на Солнце существует категория малых вспышек, для которых соотношение времени подъема и продолжительности носит дискретный характер (возможно, дискретный характер носит энергия вспышек).

Получено распределение солнечных вспышек по энергии в оптическом диапазоне длин волн. Согласно [Woods et al., 2006] большая часть энергии солнечных вспышек приходится на ультрафиолетовую и бальмеровские области спектра. В работах Курочка и др. [Курочка и др., 1981а, б, в] было показано, что полная энергия вспышек во всех линиях и континуумах водородных серий тесно связана с излучением в линии H α . Авторами с учетом изменений со временем площади и интенсивности вспышек было получено выражение для средней суммарной энергии, излучаемой вспышками разной мощности в оптическом диапазоне $E_n = 4.7 \cdot 10^{-22} \alpha(i)S(i)T(i)I_{3,2}^2(i)$, где E_n — полная энергия вспышки, эрг; i — балл; $I_{3,2}(i)$ — центральная интенсивность H α , эрг/(см³·с·ср); $S(i)$ — типичная площадь вспышки [см²]; $T(i)$ — типичная продолжительность вспышки, [с]; $\alpha(i)$ — коэффициент, учитывающий во вспышке распределение интенсивности.

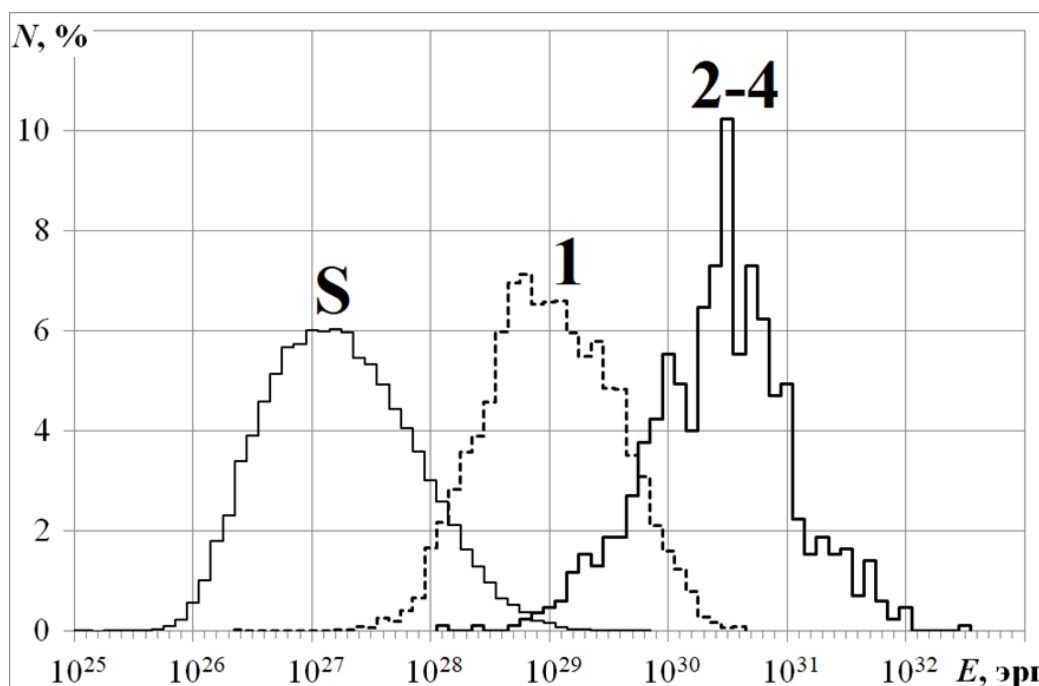


Рисунок 5. Распределение оптических вспышек по энергии.

С использованием данных $\alpha(i)$ и $I_{3,2}(i)$ из работ Курочка и др., вместо типичных значений $S(i)$ и $T(i)$ распределения вспышек по площади $\bar{S}(i)$ и продолжительности $\bar{T}(i)$ [Borovik, Zhdanov, 2018; Borovik, Zhdanov, 2019] были получены распределения энергии E в видимой спектральной области в зависимости от балла и класса площади вспышек (рис. 5), а также средние значения \bar{E} (таблица 3).

Таблица 3. Средние значения энергии вспышек в оптическом диапазоне

	N	$\bar{S} \cdot 10^{-18}, \text{cm}^2$		$\bar{T} \cdot 10^{-3}, \text{с}$		$\bar{E}, \text{эрг}$	
		I	II	I	II	I	II
SF	49305	0.8	1.7	1.1	1.0	$2.2 \cdot 10^{27}$	$3.8 \cdot 10^{27}$
SN	15927	1.3	1.7	1.4	1.0	$8.7 \cdot 10^{27}$	$7.1 \cdot 10^{27}$
SB	3456	1.5	1.7	1.6	1.0	$2.9 \cdot 10^{28}$	$1.7 \cdot 10^{28}$
1F	1296	4.2	4.2	2.3	2.5	$4.2 \cdot 10^{28}$	$4.9 \cdot 10^{28}$
1N	2340	4.4	4.2	2.7	2.5	$1.2 \cdot 10^{29}$	$1.1 \cdot 10^{29}$
1B	1586	4.7	4.2	3.2	2.5	$5.0 \cdot 10^{29}$	$3.5 \cdot 10^{29}$
2F	59	9.9	11.9	3.3	5.2	$3.2 \cdot 10^{29}$	$6.2 \cdot 10^{29}$
2N	268	10.3	11.9	4.4	5.2	$1.5 \cdot 10^{30}$	$2.0 \cdot 10^{30}$
2B	453	10.8	11.9	5.0	5.2	$5.9 \cdot 10^{30}$	$6.2 \cdot 10^{30}$
3F	6	27.2	24.6	3.5	8.8	$2.8 \cdot 10^{30}$	$7.1 \cdot 10^{30}$
3N	11	22.7	24.6	9.1	8.8	$2.2 \cdot 10^{31}$	$2.2 \cdot 10^{31}$
3B	48	25.0	24.6	6.6	8.8	$4.4 \cdot 10^{31}$	$6.0 \cdot 10^{31}$
4F	0	–	42.5	–	13.0	–	$5.5 \cdot 10^{31}$
4N	2	37.9	42.5	2.7	13.0	$2.8 \cdot 10^{31}$	$1.5 \cdot 10^{32}$
4B	3	48.1	42.5	3.7	13.0	$1.3 \cdot 10^{32}$	$4.5 \cdot 10^{32}$

Пояснение к таблице 3: \bar{S} — средняя площадь вспышки; \bar{T} — средняя продолжительность вспышки; II — данные работ [Курочка и др., 1981а, б, в]; I — результаты работы [Borovik, Zhdanov, 2019].

Гистограммы показывают, что между оптическими вспышками разных классов площади наблюдается взаимное перекрытие по энергиям, в результате чего в интервал энергий крупных солнечных вспышек (2–4) попадает до 9.5% вспышек малой мощности. Это свидетельствует о том, что малые вспышки могут иметь энергию, сопоставимую с энергией крупных солнечных вспышек.

В Разделе 2.5 приводятся результаты исследования вспышек малой мощности в рентгеновском диапазоне по данным спутников GOES в 21–24 солнечных циклах. Установлено, что малые вспышки, как и крупные, могут сопровождаться потоками протонов [<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP>] и рентгеновским излучением разной мощности, в том числе класса X (таблица 4, рис. 6). Показано, что диапазоны излучения в мягком рентгене во всех классах площади оптических вспышек в значительной степени перекрываются.

Таблица 4. Рентгеновские вспышки и протонные события в 21–24 циклах

	рентгеновские вспышки				протонные события (E > 10 МэВ)			
	B	C	M	X	B	C	M	X
SN	326	4309	477	6		1	2	
SB	36	1479	447	10			2	1
1F	25	947	268	8		3	6	3
1N	7	1217	764	17			12	5
1B	8	548	914	57			5	6
2F	1	38	49	1		2		
2N		75	191	16		1	14	9
2B		43	357	159			21	30
3F								
3N		2	6	6			2	
3B		2	26	67			9	33
4F								
4N								
4B			3	6			2	5
S	3593	19106	1644	32		3	7	1
1	40	2712	1946	82		3	23	14
2-4	1	160	632	255		3	48	77

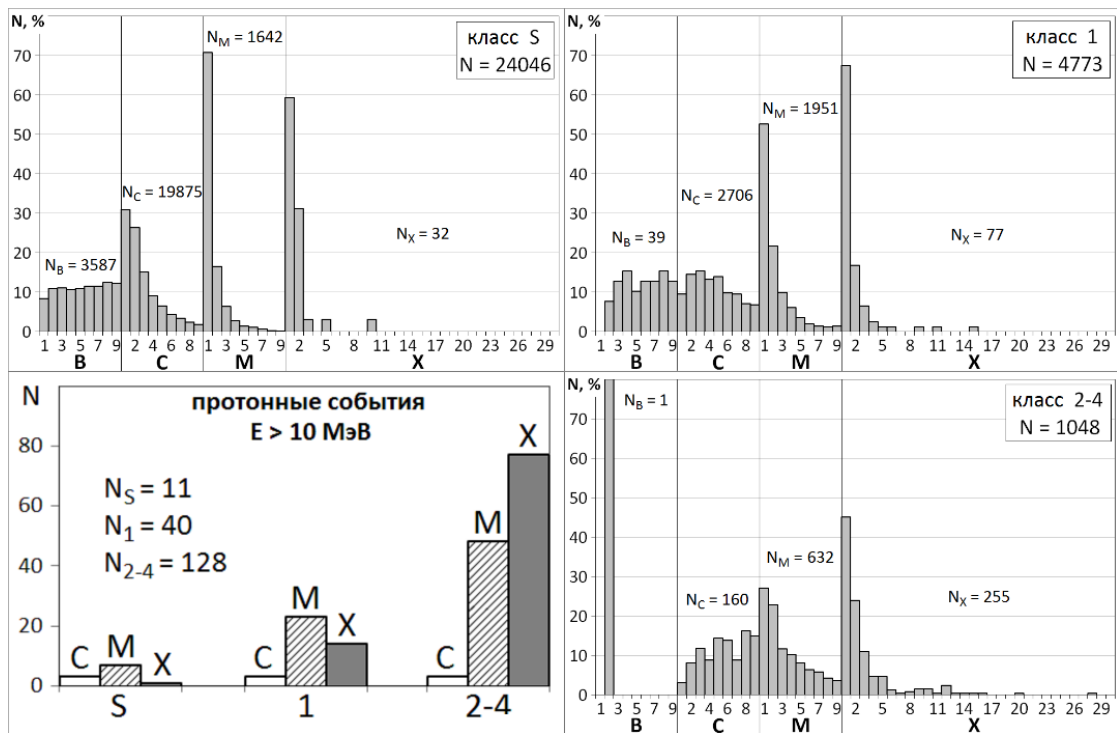


Рисунок 6. События, сопутствующие оптическим вспышкам классов S, 1 и 2–4 в 21–24 солнечных циклах (данные GOES): две верхние и нижняя правая панели — рентгеновское излучение соответствующих классов; левая нижняя панель — протонные события.

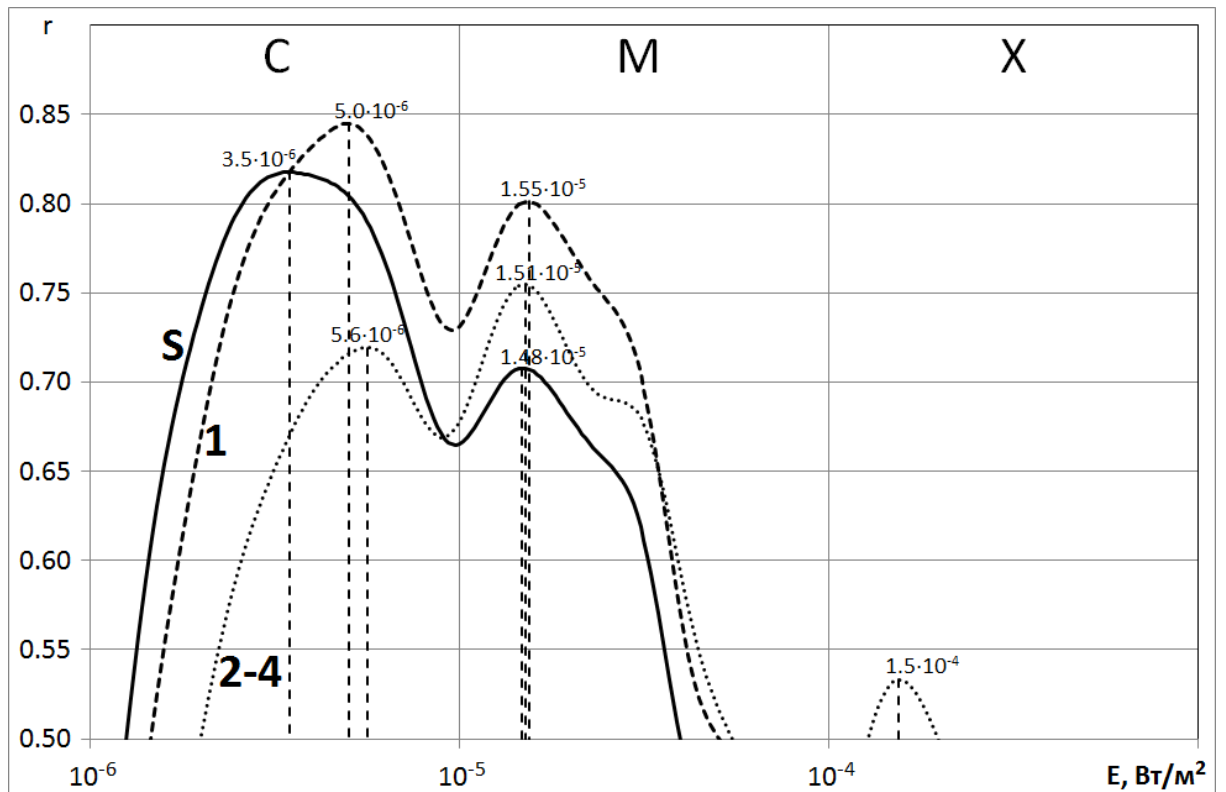


Рисунок 7. Распределение коэффициентов корреляции между максимальной амплитудой рентгеновского всплеска и числом оптических вспышек площади S, 1 и 2-4.

С высокой и почти равной вероятностью все оптические вспышки могут сопровождаться рентгеновским излучением как слабой, так и средней мощности (С и М) и только в отдельных случаях — мощным излучением класса Х (рис. 7).

В процессе работы был разработан метод выделения в Na вспышечных событий, сопровождающихся рентгеновским излучением. Для этого, как и при исследовании вспышечных параметров, из базы данных были исключены все оптические вспышки, долгота которых превышала 65° . Исключены также вспышки, для которых время начала рентгеновского всплеска не было достоверно установлено. Затем из сформированной таким образом базы данных отбирались оптические вспышки, произошедшие в пределах 10-минутного интервала от начала рентгеновского всплеска. Если в этом временном интервале на Солнце произошло несколько оптических вспышек, то такой рентгеновский всплеск не рассматривался.

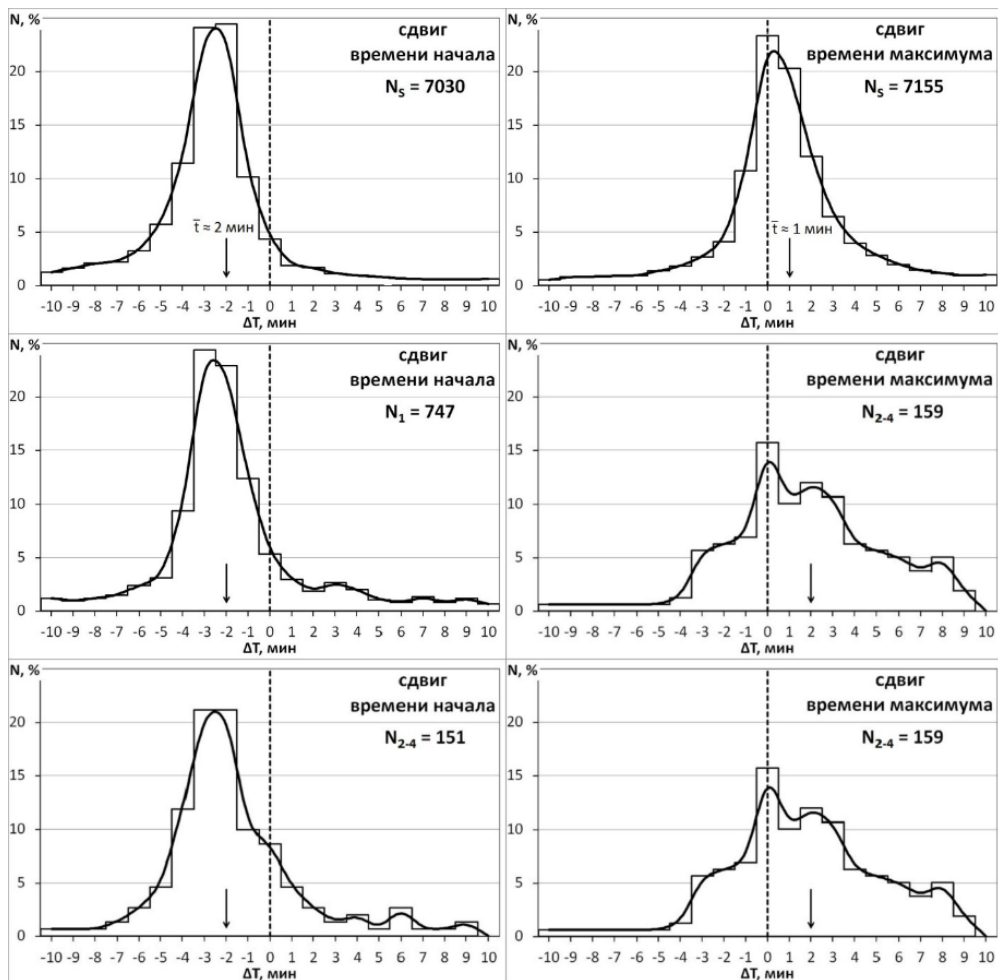


Рисунок 8. Распределения временных интервалов между началом (максимумом) вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах. Штриховой вертикальной линией показано начало оптической вспышки, стрелкой — среднее значение гистограммы.

Если встречалась только одна оптическая вспышка, то в этом случае сравнивались ее координаты с координатами рентгеновской вспышки в базе данных GOES. При несоответствии балла и разнице в координатах более чем на 5° рентгеновская вспышка также не рассматривалась. Если все проверки проходили успешно, считалось, что рентгеновский всплеск с высокой долей вероятности соответствовал данной оптической вспышке. Результаты показали, что примерно 25 % рентгеновских вспышек GOES уверенно не отождествлялись с оптическими вспышками NOAA.

Было установлено, что рентгеновский всплеск как в малых, так и в крупных вспышках возникает в среднем примерно на две минуты раньше оптического излучения. Максимум рентгеновского излучения для вспышек малой мощности и вспышек класса 1 наступает примерно на одну минуту позже максимума излучения в оптическом диапазоне, для вспышек классов площади 2–4 — на две минуты позже (рис. 8).

Глава 3 посвящена исследованию пространственно-временного распределения вспышек малой мощности на поверхности Солнца и в группах пятен с крупными вспышками.

В **Разделе 3.1** представлены результаты исследования пространственного распределения малых вспышек по диску Солнца. Разработан метод выделения областей с повышенной активностью МВ. Для этого солнечный диск был разбит гелиографической сеткой на ячейки $2^\circ \times 2^\circ$, в каждой из которых согласно координатам определено количество произошедших в них малых вспышек (рис. 9). Смежным группам ячеек, в которых произошли две и более вспышки, дано название «Центр вспышечной активности».

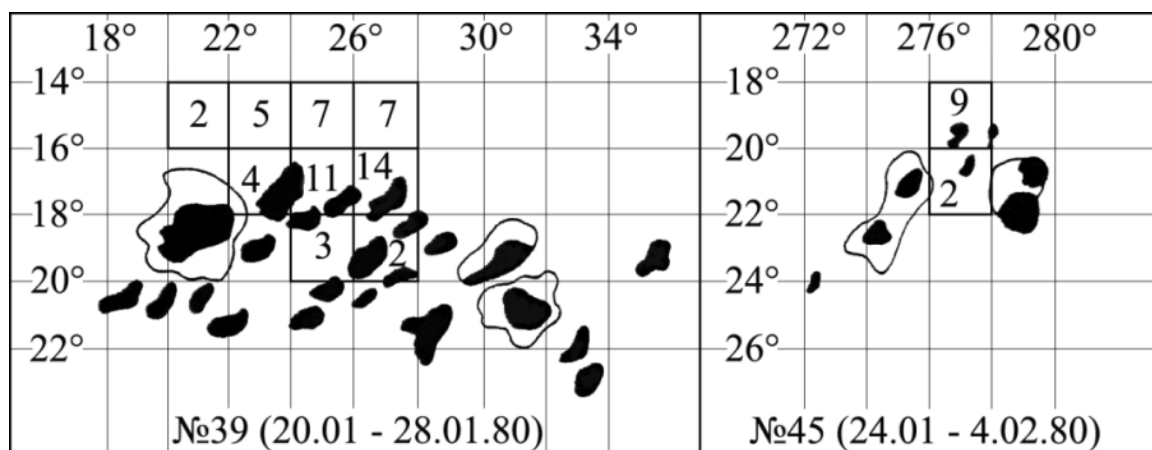


Рисунок 9. Центры вспышечной активности групп солнечных пятен N39 и N45 (нумерация бюллетеня Солнечные данные). Поры и пятна зачернены, в ячейках указано число малых вспышек, произошедших в активной области за время прохождения по солнечному диску.

Для каждого кэррингтоновского оборота циклов 21–24 были построены синоптические карты распределения малых вспышек по поверхности Солнца. Установлено, что вспышки малой мощности распределены неравномерно и образуют в областях интенсивных выходов магнитных потоков плотные скопления (рис. 10). ЦВА наблюдаются практически на всех стадиях развития АО. Как правило, внутри ЦВА находится ядро (иногда два), где плотность вспышек максимальна. От ядра к периферии их число уменьшается.

На примере более 400 АО показано, что ЦВА в основном формируются в хвостовой и центральной частях групп солнечных пятен и могут существовать от 1.6 до 9 сут. После исчезновения они могут вновь появляться на том же месте спустя 1–5 оборотов.

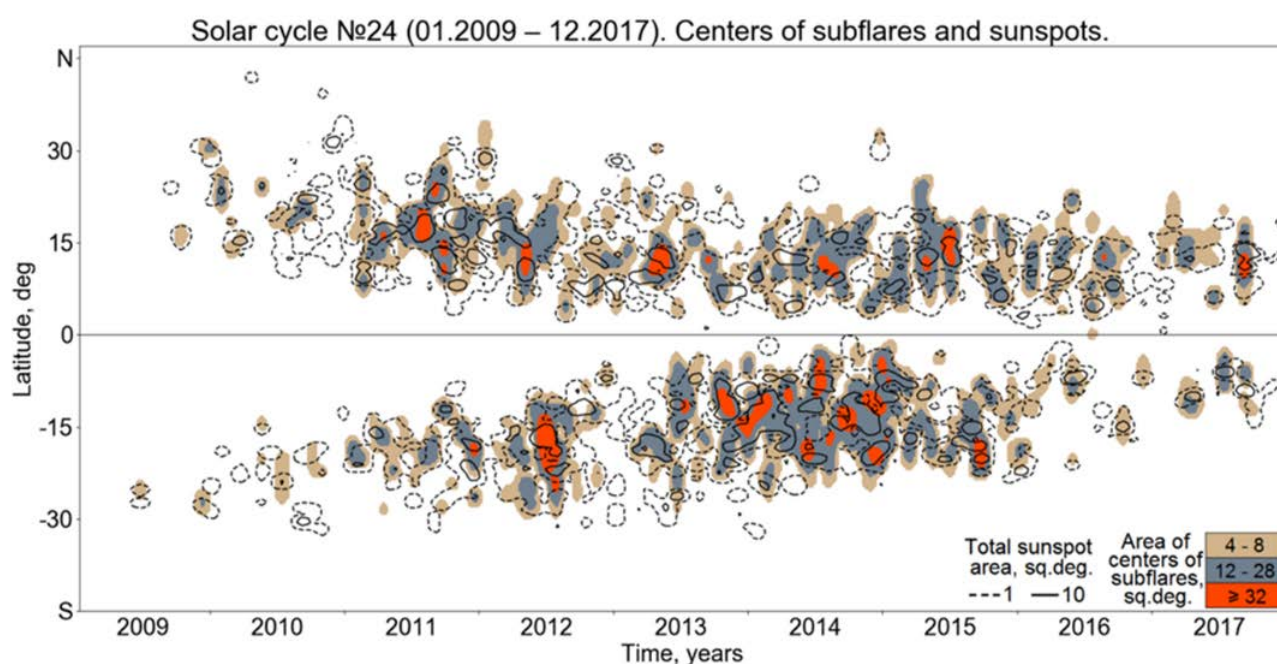


Рисунок 10. Широтное распределение солнечных пятен и центров вспышечной активности в 24-м солнечном цикле.

С ЦВА связаны арочные системы волокон (AFS), темные и яркие серджи, активизации и исчезновения волокон. Из полученных результатов следует, что центр вспышечной активности можно рассматривать как один из предикторов появления всплывающих магнитных полей на Солнце, дающий возможность проведения диагностики нестационарных процессов в атмосфере Солнца в глобальном аспекте.

В Разделе 3.2 рассмотрены малые вспышки в активных областях с крупными мощными вспышками. Обнаружено, что малые вспышки почти не встречаются в областях групп солнечных пятен, где развиваются крупные солнечные вспышки (рис. 11). За несколько десятков минут (или часов) до

мощной вспышки частота малых вспышек снижается или прекращается вовсе (рис. 12). Это может быть одним из условий накопления магнитным полем АО энергии для крупной вспышки.

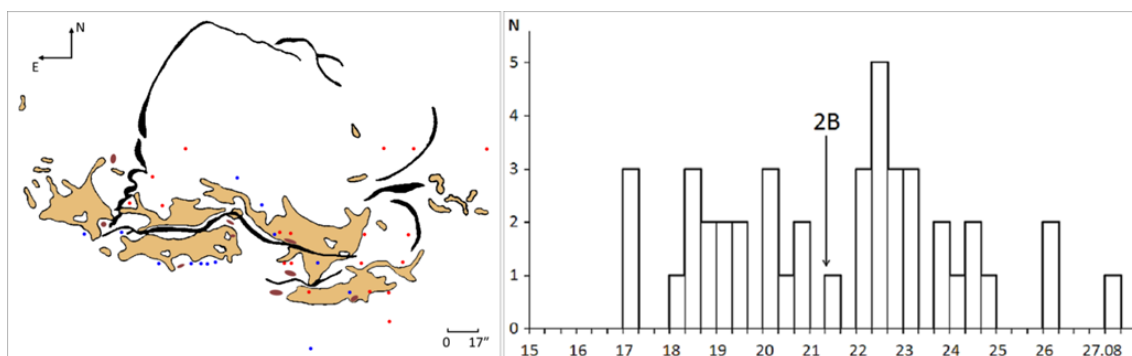


Рисунок 11. Крупная солнечная вспышка 21.08.81 (2B, S16 E02, 08:26 UT). Пространственно-временное распределение малых вспышек в активной области. Красные точки — положения малых вспышек до крупной вспышки, синие — после.

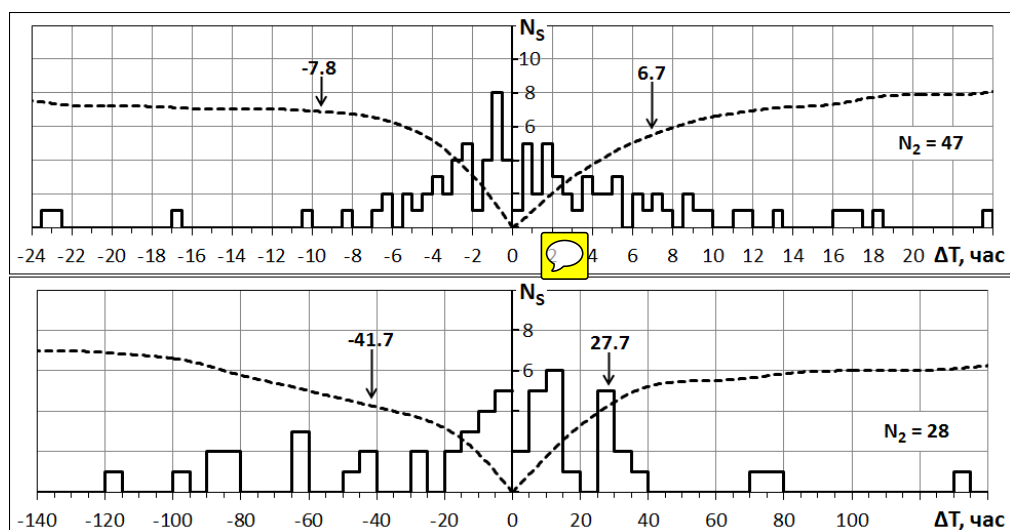


Рисунок 12. Распределение ближайших к крупным вспышкам временных интервалов, свободных от вспышек малой мощности (верхняя панель) и серий малых вспышек — вспышек, происходящих подряд с интервалом менее 100 мин (нижняя панель). Штриховые кривые — накопленные частоты. N_2 — число рассмотренных вспышек класса площади 2.

Вместе с тем было показано, что предложенный в качестве прогноза крупных вспышек рост частоты малых вспышек за несколько дней до мощной вспышки [Dodson, Hedeman, 1976] не имеет отношения к их возникновению. Примерно одинаковая активность малых вспышек до и после крупных вспышек и их появление при полном отсутствии в АО вспышек малой мощности (рис. 13) указывают на связь малых вспышек с эволюционными особенностями развития активных областей.

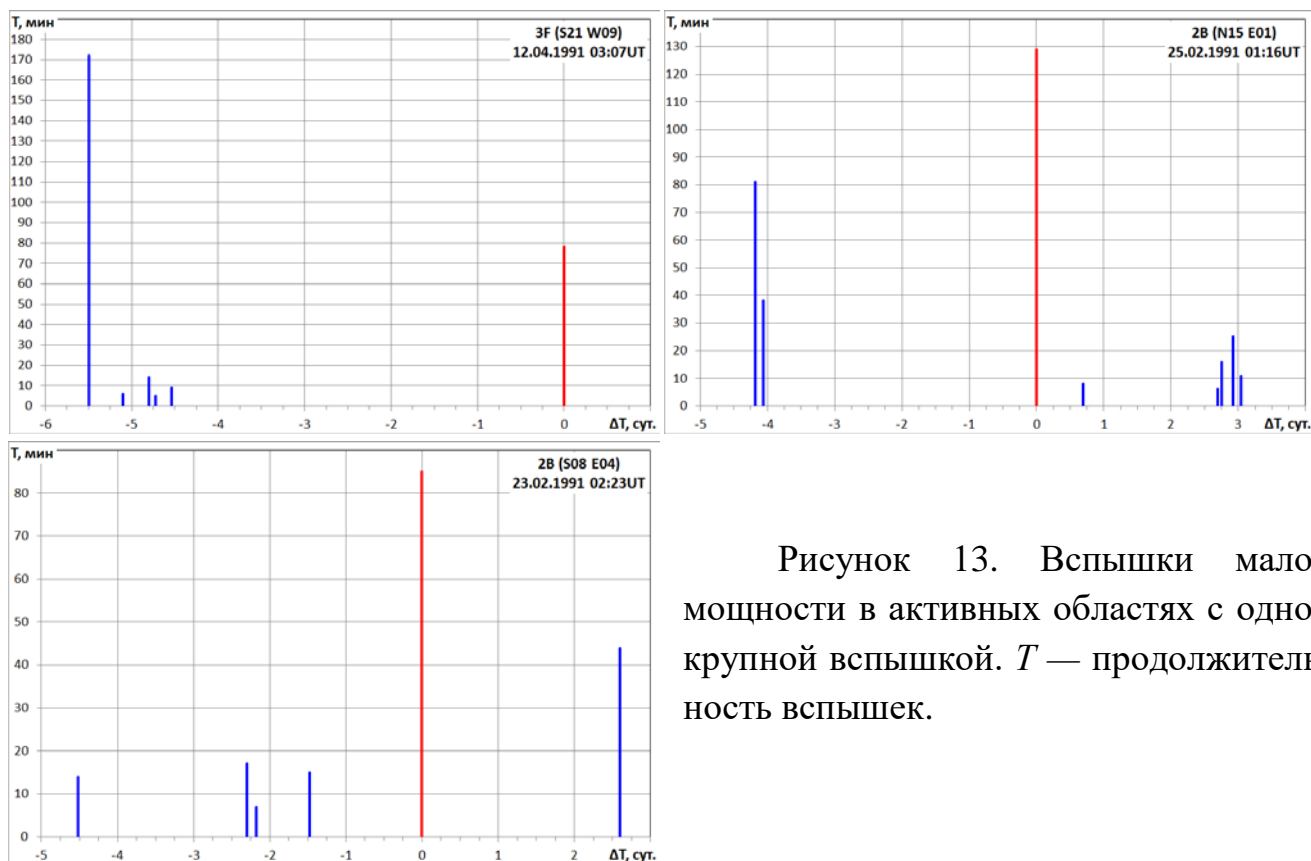


Рисунок 13. Вспышки малой мощности в активных областях с одной крупной вспышкой. T — продолжительность вспышек.

Глава 4 содержит результаты исследования солнечных вспышек малой мощности по наблюдениям в линии $H\alpha$.

В **Разделе 4.1** приводится описание хромосферного телескопа полного диска Солнца на линию $H\alpha$.

В **Разделе 4.2** обсуждаются результаты исследования астроклиматических характеристик Байкальской астрофизической обсерватории, условий наблюдения тонкой структуры хромосферы и солнечных вспышек. Показана уникальность астроклимата БАО.

В **Разделе 4.3** изложены методы обработки изображений Солнца на электронных и фотографических носителях, аппаратно-программный комплекс, разработанный ИОА СО РАН для обработки наблюдательных материалов БАО.

В процессе исследований были разработаны новые принципы построения световых кривых солнечных вспышек в линии $H\alpha$. Показано, что для получения достоверного представления об особенностях развития вспышки важен предварительный анализ яркости реперных участков хромосферы, а также способ измерения интенсивности вспышек. Выбор реперной области должен осуществляться на основании двух критериев: флуктуации яркости реперной области должны быть незначительными и не должны коррелировать с областью вспышки. Профиль световой кривой строится без искажений, если измерения интенсивности проводятся по максимальной, а не по средней интенсивности вспышки (рис. 14). Разработанные в процессе исследования принципы построения

световых кривых в дальнейшем были использованы при фотометрических измерениях малых вспышек.

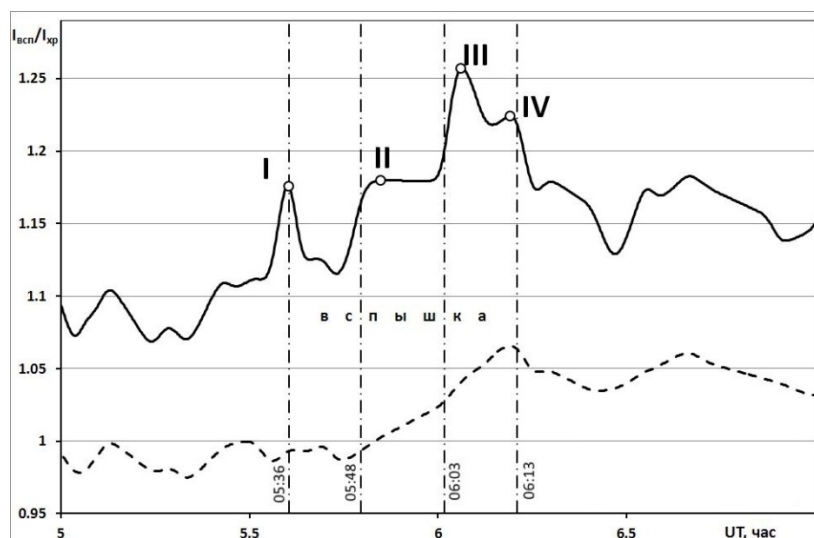


Рисунок 14. Световые кривые внепятенной вспышки 5 июля 2001 г., построенные по средней (штриховая линия) и максимальной (сплошная линия) яркости вспышки.

Раздел 4.4 посвящен исследованию структуры и развития вспышек малой мощности.

По результатам наблюдений более 130 малых вспышек выделены основные структурные элементы вспышек на диске и лимбе и определены их характеристики. Было установлено также, что малым вспышкам, как и крупным солнечным вспышкам, предшествуют возмущения хромосферных структур разных масштабов. Выделено два вида активизаций: крупномасштабные (проявляют себя до расстояний ~ 220000 км от места вспышки за 40–50 мин до ее начала) и мелкомасштабные (возникают за 10–20 мин до вспышки в пределах ближайших одного-двух ярусов супергрануляционных ячеек). Установлено, что малые вспышки, как правило, возникают и развиваются на границах ячеек хромосферной и магнитной сеток, обладающих широким спектром масштабов — от мезогранул до супергранул и больше (рис. 15 А, Б).

В **Разделе 4.5** приводятся результаты исследования вспышек малой мощности в развивающейся активной области СД № 135, полученные в рамках комплексной программы КАПГ «Крупномасштабные поля и рождение активных областей» 1984 г.

Подтверждено существование в АО конвективных структур, сопоставимых по размерам с супергранулами [Grigoryev, Selivanov, 1986]. Показано, что малые вспышки в начале развития АО сформировали ЦВА вблизи хвостового пятна АО, где наблюдались наиболее сильные изменения магнитных полей. Затем

вспышечная активность переместилась в центральную часть АО и вспышки стали возникать по границе конвективной ячейки размером ~ 26000 км, которая на картах лучевых скоростей Саянской обсерватории отождествлялась с ячейкой максимальных скоростей опускания солнечной плазмы ($V=0.6$ км/с), а в линии $H\alpha$ — с ячейкой хромосферной сетки.

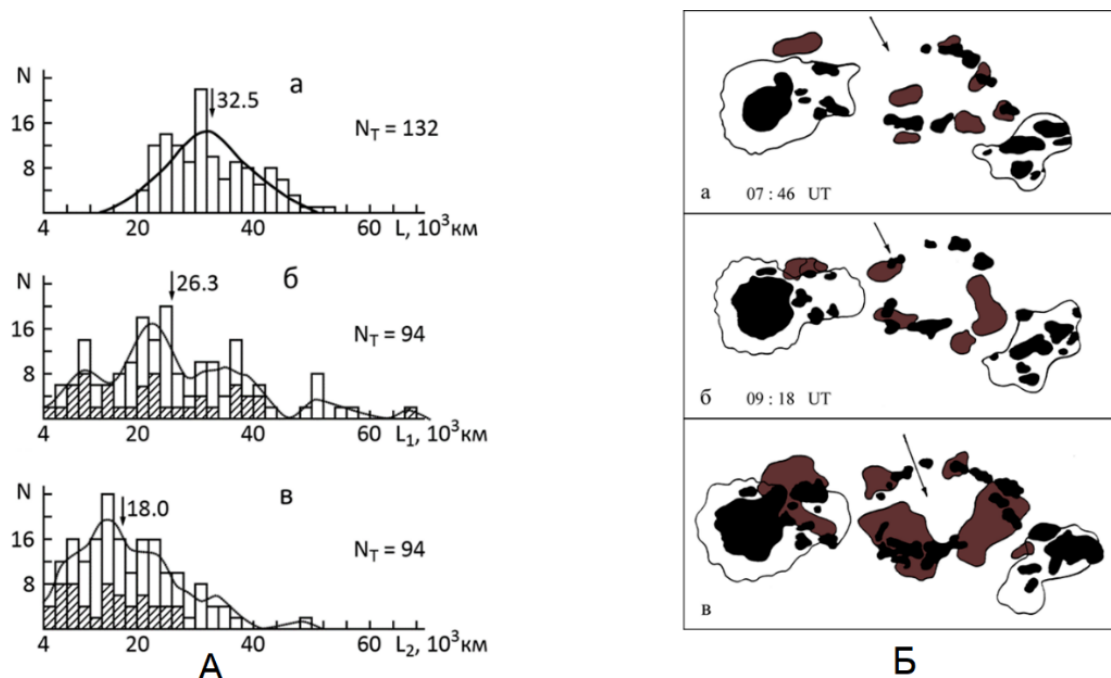


Рисунок 15. А – Распределение вспышечных ячеек по размерам (А): а — распределение по размерам супергранул спокойных областей [Simon, Leighton, 1964]; б — большие оси вспышечных ячеек (L_1); в — малые (L_2). Малые вспышки (Б) – в активной области СД № 135 (нумерация бюллетеня «Солнечные данные»). Черные области — пятна, коричневые — вспышечные поля.

На фотосфере границы ячейки отмечали цепочки мелких пятен и пор (рис. 15, Б). На рисунке стрелками показан случай, когда появление вспышки по времени и месту совпало с появлением двух мелких пор. Из совмещенной картины солнечных пятен и малых вспышек 23 июня 1984 г. (рис. 15 Б, в) следует, что вспышки малой мощности возникали на границе конвективной ячейки, где происходили всплывания новых магнитных потоков и появлялись пятна.

Высокая активность малых вспышек по времени совпадала с периодом интенсивного роста магнитного потока АО (рис. 16, 4–7 UT), который сопровождался массовым появлением арочных волоконных структур (AFS).

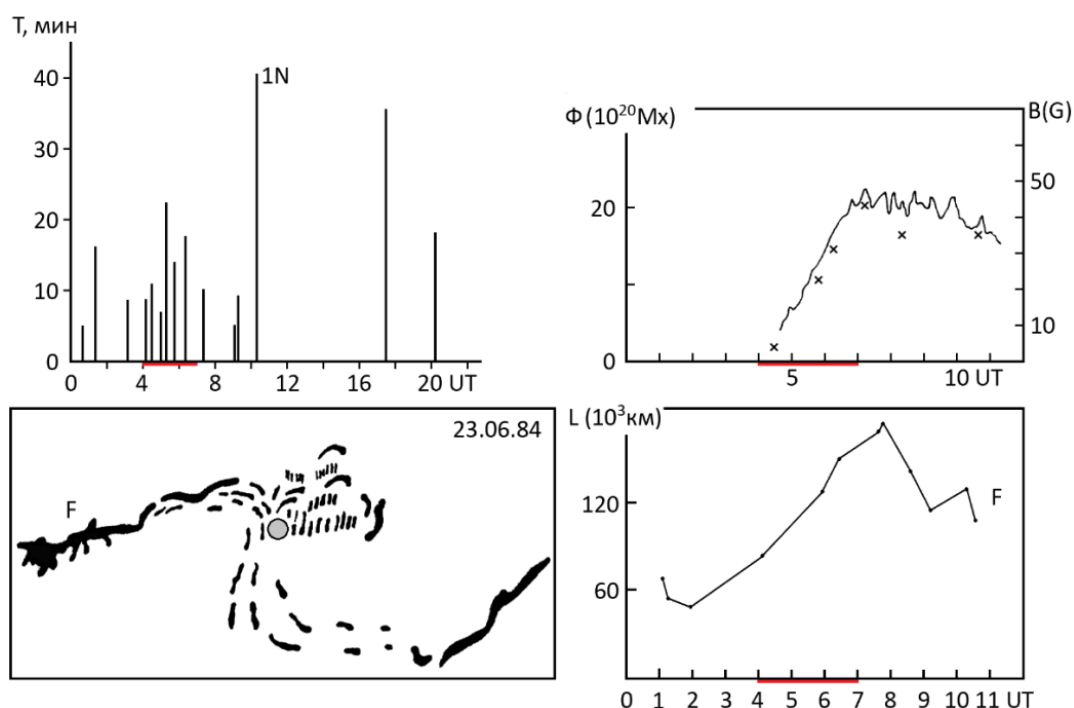


Рисунок 16. Вспышки малой мощности 23 июня 1984 г. в развивающейся активной области СД № 135 (NOAA 4520):

- развитие вспышечной активности в АО СД135 [Боровик и др., 1986];
- изменение площади опускания вещества в области лидирующего (р) и хвостового (f) пятен [Grigoryev, Selivanov, 1986];
- изменение интегрального магнитного потока (Φ) и интегральной напряженности магнитного поля (B) [Grigoryev, Selivanov, 1986];
- изменение длины волокна F [Язев, 1985].

В это же время наблюдалась активизация связанного с АО удаленного волокна F. С ростом Φ , B и S оно удлинялось по направлению к АО, а затем после 7 UT, когда Φ , B и S достигли максимальных значений и стали уменьшаться, последовало за ними и стало сокращаться.

Результаты исследования развивающейся АО СД № 135 убедительно показали, что активизации хромосферных структур и уровень вспышечной активности АО связаны с крупномасштабными изменениями магнитного поля активной области. Они также подтвердили, что вспышки малой мощности возникают на границах конвективных ячеек во время всплытия новых магнитных потоков.

В Разделе 4.6 рассматривается динамика магнитного поля активной области NOAA 12673, в которой в сентябре 2017 г. произошла серия мощных вспышек, включая крупнейшую за последнее десятилетие вспышку класса X9.3 (рис. 17).

Обнаружено, что малые вспышки возникают вблизи локальных короткоживущих мелкомасштабных линий раздела полярности (ЛЛРП),

формирующихся в АО при всплывании новых магнитных потоков и их сближении с полями противоположной полярности (рис. 18). Время существования таких ЛЛРП составляет всего несколько часов, протяженность — менее 15000 км (20 угл. сек). Для сравнения: протяженность основной ЛРП активной области (Рисунок 21) составляла ~60000 км (~80 угловых секунд). Перед крупной солнечной вспышкой 6 сентября она формировалась в течение двух суток и просуществовала до полного распада четверо суток. Т.е. локальные линии раздела полярности короче ЛРП более чем в четыре раза, а их время существования меньше в десятки раз.

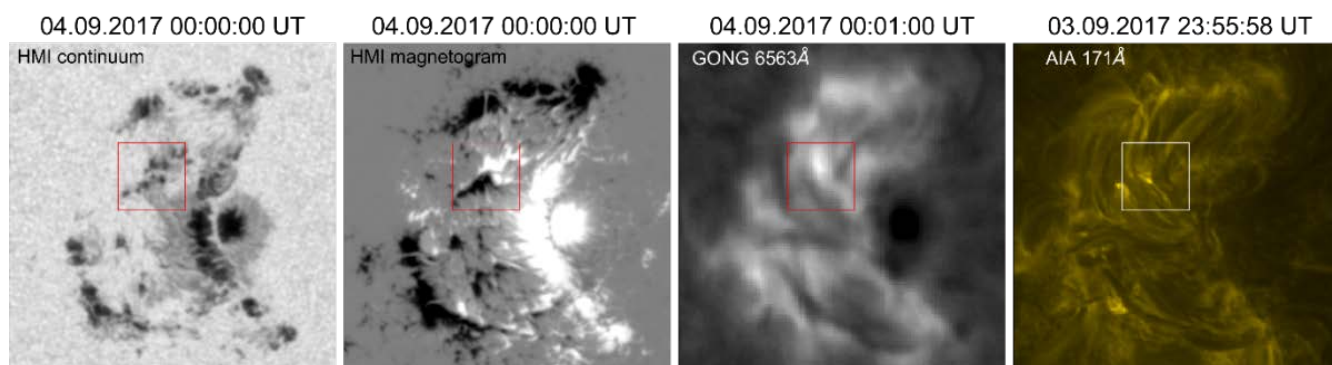


Рисунок 17. Активная область NOAA 12673 по наблюдениям в континууме (SDO/HMI), линии $H\alpha$ (GONG) и линии 171 \AA SDO/AIA. Приведена HMI-магнитограмма АО. Квадратом 25×25 пкс выделена область одной из малых вспышек.

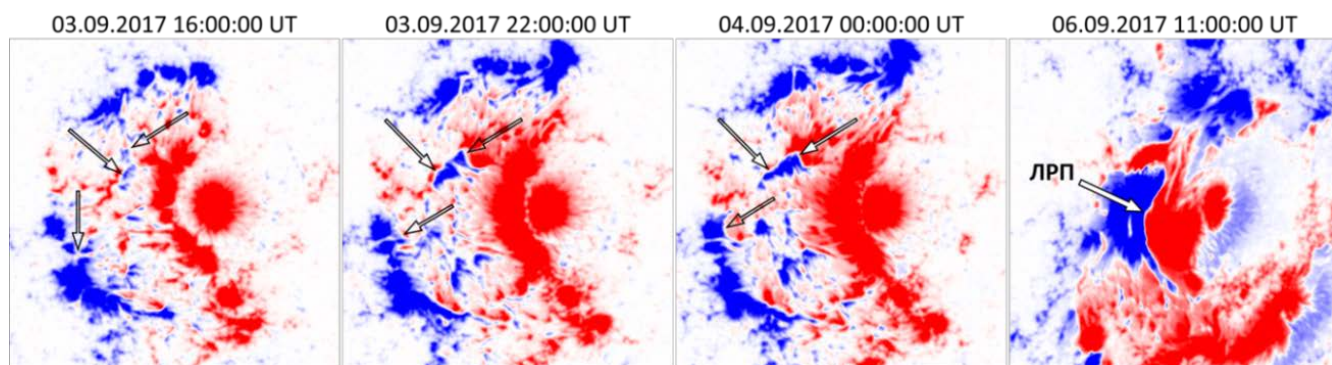


Рисунок 18. Локальные линии раздела полярности активной области NOAA 12673. Синим и красным цветом выделены поля северной и южной полярности. Стрелками указаны три области формирования ЛЛРП. На четвертой панели показана ЛРП, сформировавшаяся в АО за два дня перед вспышкой 9.3 X.

Была разработана методика измерения градиента магнитного поля вдоль ЛЛРП и определения корреляционных связей по противоположные стороны от линии раздела полярности. ЛЛРП на момент начала вспышки была разделена перпендикулярными отрезками 2 угл. сек на участки с шагом в один пиксель (рис.

19). Затем отрезки были перенесены на последующие и предыдущие магнитограммы и на их концах определены напряженности и градиенты поля.

В результате было обнаружено, что в предвспышечный период на ограниченных участках ЛРП в области малых вспышек возникали сдвиговые напряжения магнитного поля (прямые и перекрестные корреляционные связи) и наблюдался рост градиента до значений 1.3–1.5 Гс/км (рис. 19, 20).

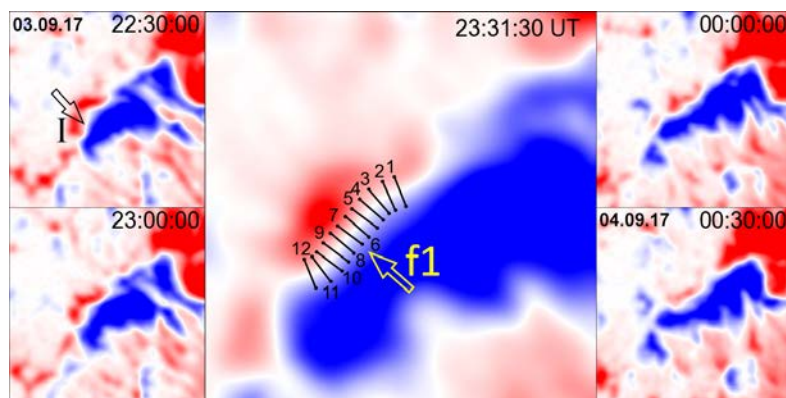


Рисунок 19. Изменения напряженности (нижние панели) и градиента продольного магнитного поля в области вспышек малой мощности f1 (3.09.2017, 23:31:30 UT).

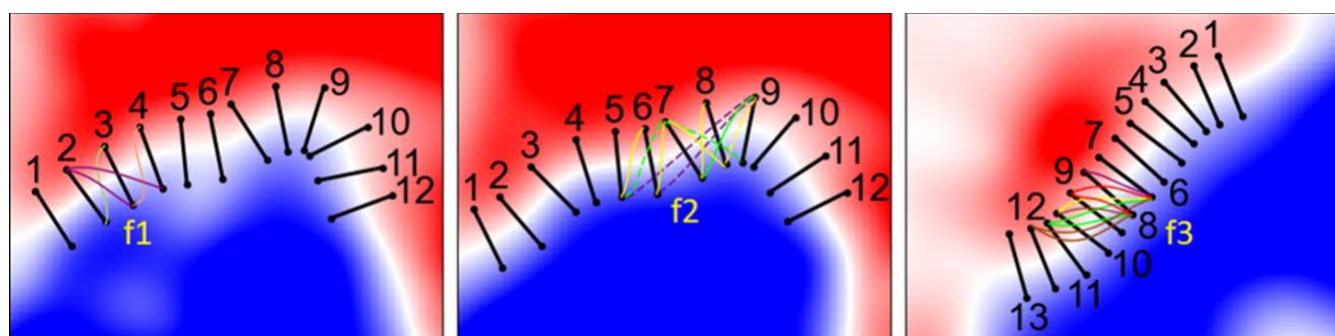
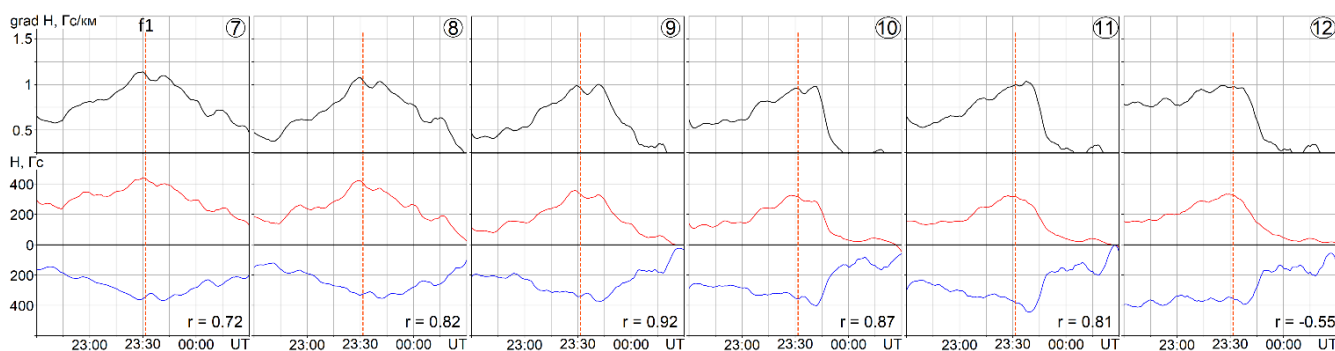


Рисунок 20. Корреляционные связи между магнитными полями противоположной полярности в области трех малых вспышек. Прямые связи выделены зеленым цветом. Для f1 и f3 коэффициенты корреляции составляют 0.9 и выше, для f2 — 0.8–0.85 (пунктирная линия), 0.85–0.9 (сплошная).

Согласно современным модельным представлениям, сближение магнитных полей противоположной направленности ведет к пересоединению магнитных полей и высвобождению свободной энергии магнитного поля в виде вспышки.

Сравнительный анализ с мощной вспышкой рентгеновского класса X9.3 показал, что аналогичные явления наблюдаются и перед крупными вспышками (рис. 21). При этом градиент магнитного поля на отдельном участке ЛРП достигает значения 3–3.5 Гс/км.

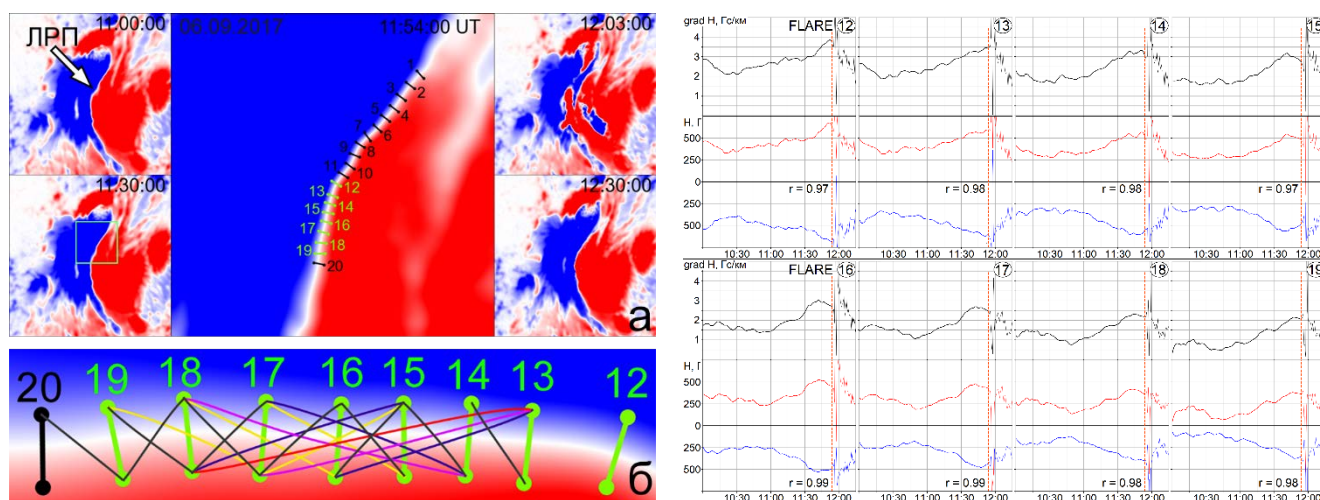


Рисунок 21. Структура магнитного поля в активной области NOAA 12673 за час до и час после мощной вспышки (а); корреляционные связи (б) в области мощной вспышки между магнитными полями противоположной полярности ($r = 0.9$ и выше): перекрестные и прямые (зеленый цвет).

Полученные результаты показывают, что механизмы возникновения вспышек малой мощности могут принципиально не отличаться от механизмов крупных солнечных вспышек.

В **Главе 5** рассматриваются вспышки в спокойных областях Солнца в отсутствие солнечных пятен. Обсуждается их эволюция, предвспышечные изменения хромосферы перед внепятенными вспышками, связь с магнитными полями и структурой хромосферы.

Установлено, что внепятенным вспышкам, как и вспышкам в группах пятен, предшествует период эволюции АО, сопровождающийся возмущением обширных полей тонкой структуры хромосферы, волокон (рис. 22), хромосферной сетки. Наибольшая частота предвспышечных активизаций хромосферы приходится на интервал 10–60 мин до начала вспышки. Предполагается, что причиной таких активизаций является крупномасштабная реструктуризация магнитных полей.

Возникают внепятенные вспышки, как правило, на границах хромосферной и магнитной сеток вблизи холмов усиленного магнитного поля, в которых наблюдается рост напряженности поля (Рисунок 23А, Б).

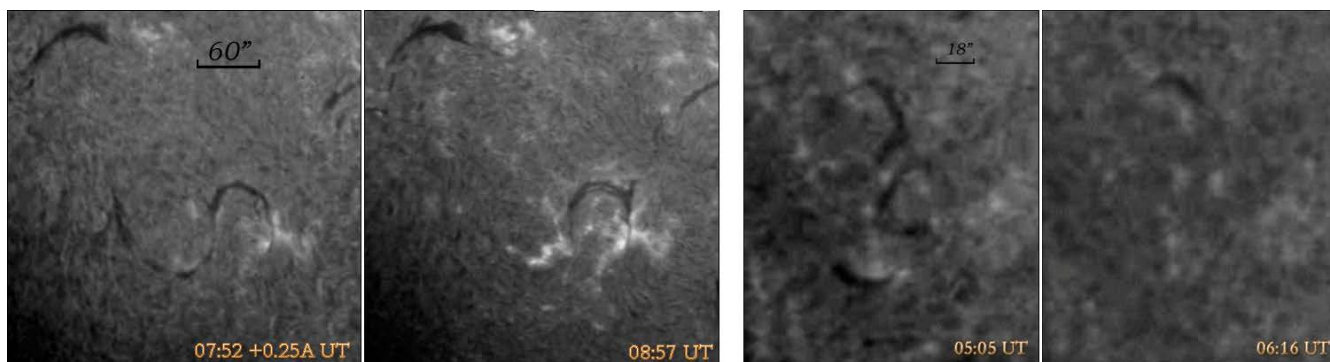


Рисунок 22. Активизация волокна перед внепятенными вспышками 5.06.2002 (слева) и 28.06.2001.

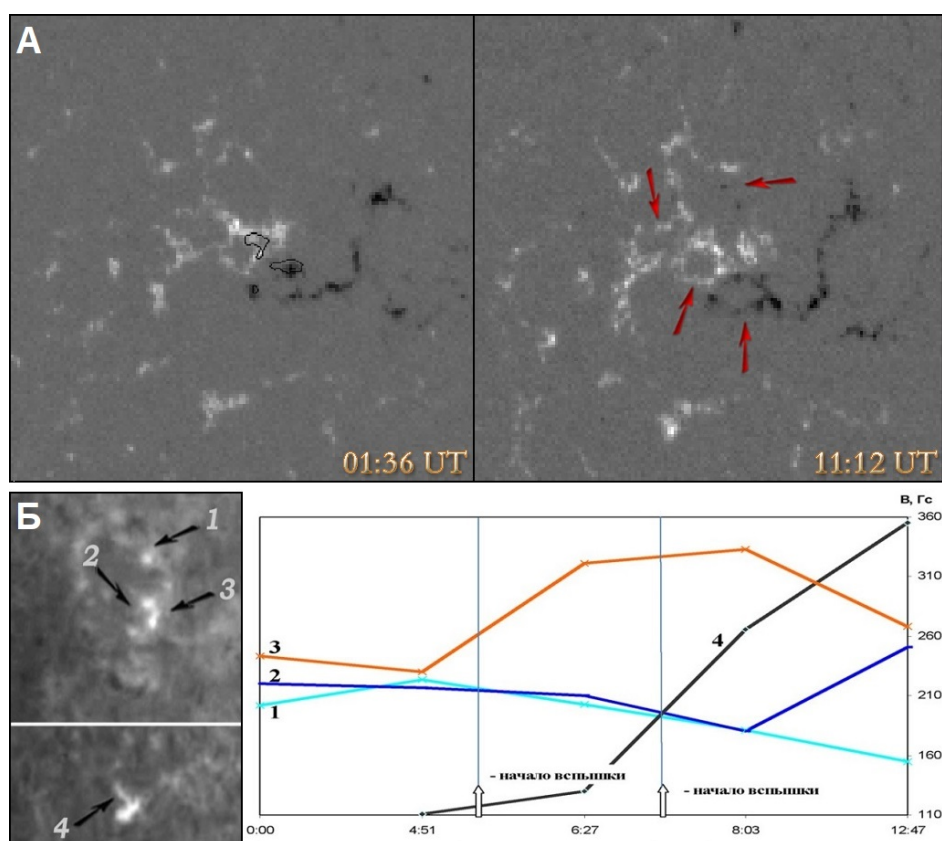


Рисунок 23. Вспышка 5 июня 2002 г. (А). Магнитограммы SOHO/MDI до и после вспышки. Стрелки показывают на области изменения структуры магнитного поля. Контуром показаны крупные узлы вспышки; изменение напряженности поля в магнитных холмах вблизи внепятенных вспышек 28 июня 2001 г. (Б).

Развитие вспышечной эмиссии происходит последовательно от одного магнитного холма к другому.

Результаты детального исследования показывают, что большинство событий и явлений, сопровождающих внепятенные вспышки, аналогичны вспышкам в активных областях Солнца.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Солнечные вспышки малой мощности относятся к самому многочисленному классу солнечных вспышек. Их доля от общего числа происходящих на Солнце вспышек составляет более 90 %. Большинство относится к вспышкам балла SF (64 %). Получены полные и статистически достоверные данные о параметрах солнечных вспышек: времени подъема яркости к максимуму, времени спада, относительном времени подъема и продолжительности. Обнаружена высокая корреляция между временем подъема яркости вспышек малой мощности к максимуму и общей их продолжительностью. Обнаружено, что на Солнце существует категория малых вспышек, относительное время подъема которых имеет дискретный характер.

2. Показано, что распределения вспышек малой мощности по временным параметрам, энергии и мощности рентгеновского излучения в значительной степени перекрываются со вспышками более высоких классов, в том числе с крупными вспышками.

3. Установлено, что вспышки малой мощности, как и крупные солнечные вспышки, сопровождаются потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности (в том числе класса X). Вне зависимости от оптического класса рентгеновское излучение вспышки возникает примерно на две минуты раньше оптического и достигает максимума у малых вспышек и вспышек класса площади 1 примерно на одну минуту позже оптического, для вспышек классов 2–4 — на две минуты позже.

4. Установлено, что вспышки малой мощности в областях интенсивного выхода новых магнитных потоков образуют плотные скопления — центры вспышечной активности. Наиболее мощные ЦВА формируются в развивающихся и долгоживущих группах пятен. Некоторые из них сохраняют устойчивое широтно-долготное положение и наблюдаются на том же месте на протяжении нескольких солнечных оборотов. Чаще всего в таких АО происходят крупные солнечные вспышки.

5. Обнаружено, что в областях, где развиваются крупные солнечные вспышки, малые вспышки почти не встречаются. За несколько десятков минут (или часов) до крупной вспышки активность малых вспышек снижается или прекращается вовсе, что может являться условием накопления магнитным полем активной области энергии для крупной вспышки.

6. Показано, что вспышки малой мощности, как и крупные мощные вспышки, сопровождаются активизациями хромосферных структур разных масштабов. Крупномасштабные активизации проявляют себя за 40–50 мин до начала вспышки и прослеживаются за пределы АО до расстояний 220000 км. Мелкомасштабные активизации наблюдаются за 10–20 мин до вспышки в

пределах одного-двух ближайших ярусов супергрануляционных ячеек. Факты свидетельствуют о том, что вспышки происходят во время крупномасштабной реструктуризации магнитных полей АО.

7. Выделены и определены характеристики структурных элементов малых вспышек на диске и лимбе. Установлена тесная связь малых вспышек с границами хромосферной и магнитной сеток, с конвективными ячейками АО. Показано, что хромосферная сетка АО содержит широкий спектр конвективных ячеек разных масштабов — от мезогранул до супергранул и больше.

8. Обнаружено, что вспышки малой мощности возникают вблизи участков локальных мелкомасштабных короткоживущих линий раздела полярности, где наблюдаются сдвиговые напряжения магнитного поля и рост градиента до значений 1.3–1.5 Гс/км. Аналогичное явление обнаружено у крупной мощной вспышки 6.09.2017 г., которая возникла, когда на отдельном участке ЛРП градиент магнитного поля достиг значения 3–3.5 Гс/км.

9. Исследование солнечных вспышек малой мощности в невозмущенных областях хромосферы показало, что внепятенным вспышкам, как и вспышкам в группах пятен, предшествует период эволюции спокойных областей, сопровождающийся хорошо выраженными возмущениями обширных полей тонкой структуры хромосферы, волокон и хромосферной сетки. Обнаружены не известные ранее или крайне редко встречающиеся предвспышечные активизации спокойной хромосферы — вихревые структуры S-типа, темные ленточные каналы и ячейки, предвспышечные изменения интенсивности темных узлов в области вспышки за 20 мин до ее начала. Между активными образованиями на ЛРП, разнесенными на значительные расстояния друг от друга, обнаружены пространственно-временные связи. Полученные результаты свидетельствуют о том, что причиной возмущений хромосферных структур в спокойных областях Солнца, как и в группах солнечных пятен, являются крупномасштабные изменения магнитных полей.

10. Установлено, что внепятенные вспышки, как и вспышки в группах пятен, возникают по границам хромосферной и магнитной сеток. Во время флэш-фазы вспышечные узлы, как правило, располагаются на границах ячеек в непосредственной близости от магнитных холмов, где наблюдается рост напряженности продольного поля. Развитие вспышек происходит по границам конвективных ячеек последовательно от одного магнитного холма к другому. На фазе спада диффузные части вспышек, расположенные в областях слабых магнитных полей, гаснут в первую очередь. Самое продолжительное время существуют наиболее яркие участки вспышки, которые, как было установлено Svestka et al. [Svestka et al., 1982], связаны с корональными рентгеновскими вспышечными петлями.

11. Подтверждены выводы работы [Falciani, Rigutti, 1972] о присутствии во вспышках эффекта сжатия изофот. Характер пульсаций свидетельствует о том, что, по всей вероятности, они несут информацию о динамике вспышечных процессов в короне — пересоединении магнитных полей и инжекции частиц в хромосферу.

12. В результате решения поставленных задач дана новая интерпретация роли вспышек малой мощности в общей структуре солнечной активности. Показано, что вспышки малой мощности с точки зрения особенностей развития в линии Na не отличаются от крупных мощных солнечных вспышек.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень научных журналов, утвержденных ВАК для публикации научных результатов диссертаций, и в ведущих международных рецензируемых журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования:

1. Боровик, А.В. и др. Формирование векового ряда данных по солнечной хромосфере для исследований, связанных с солнечной активностью / Ганхуа Линь, Сяо-Фань Ван, Сяо Ян и др. // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т 3, № 2 – С. 5–9. – DOI: 10.12737/22609.

2. Боровик, А.В. Модельное представление внепятенной солнечной вспышки / А.В. Боровик, Д.Ю. Мячин, А.М. Уралов // Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2015. – Т. 14. – С. 15–20.

3. Боровик, А.В. Астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН / А.В. Боровик, П.А. Коняев // Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2014. – Т. 8. – С. 25–34.

4. Боровик, А.В. Наблюдение внепятенных солнечных вспышек в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и их интерпретации / А.В. Боровик, Д.Ю. Мячин, В.М. Томозов // Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 23.

5. Боровик, А.В. Центры вспышечной активности и их связь с геомагнитной активностью / А.В. Боровик, Л.В. Боровик, В.А. Пархомов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31, № 1. – С. 187–190.

6. Боровик, А.В. Малые солнечные вспышки и супергрануляционная структура активных областей / А.В. Боровик // Кинематика и физика небесных тел. – 1989. – Т. 5, № 3. – С. 55.

7. Максимов, В.П. Исследование связи субвспышек-микроволновый всплеск / V.P. Maksimov, G.N. Zubkova, A.V. Borovik // Космические исследования. – 1991. – Т. 117. – С.118–127.
8. Antoshkin, L.V. et al. First-order adaptive system for correction of images in solar ground-based telescopes / L.V. Antoshkin, A.V. Borovik, N.N. Botygina, A.V. Bulatov, O.N. Emaleev, N.M. Firstova, B.V. Fortes, V.M. Grigoryev, P.G. Kovadlo, L.N. Lavrinova, V.P. Lukin, A.I. Petrov, V.I. Skomorovsky, A.P. Yankov // Proc. SPIE 4007, Adaptive Optical Systems Technology – 2000. – DOI: 10.1117/12.390298.
9. Borovik, A.V. Dynamics of small-scale magnetic fields before small and large solar flares / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2023. – V. 9, № 4. – P. 44–53. – DOI: 10.12737/szf-94202305.
10. Borovik, A.V. Small solar flares and local polarity inversion lines of the longitudinal magnetic field of the active region / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2022. – V. 8, № 1. – P. 19–23. – DOI: 10.12737/stp-81202202.
11. Borovik, A.V. Low-power solar flares of optical and X-ray wavelengths for solar cycles 21–24 / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2020. – V. 6, № 3 – P. 16–22. – DOI: 10.12737/stp-63202002.
12. Borovik, A.V. Restructuring of the Solar Magnetic Fields and Flare Activity Centers in Cycle 24 / A.V. Borovik, A.V. Mordvinov, E.M. Golubeva, A.A. Zhdanov // Astronomy Reports. – 2020. – V. 64, № 6. – P. 540–546. – DOI: 10.1134/S106377292007001X.
13. Borovik, A.V. Solar activity research at the Baikal Astrophysical Observatory of ISTP SB RAS / A.V. Borovik, A.A. Golovko, V.I. Polyakov, V.D. Trifonov, S.A. Yazev // Solar-Terrestrial Physics. – 2019. – V. 5, № 3. – P. 18–28. – DOI: 10.12737/stp-53201903.
14. Borovik, A.V. Statistical research into low-power solar flares / A. V. Borovik, A. A. Zhdanov // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2019. – V. 31, № 2. – P. 1–13. – DOI: 10.17184/eac.2972.
15. Borovik, A.V. The processes of energy release in low-power solar flares / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2019. – V. 4, № 4. – P. 8–16. – DOI: 10.12737/stp-41201803.
16. Borovik, A.V. Distribution of low-power solar flares by brightness rise time / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – V. 4, № 3. – P. 3–12. – DOI: 10.12737/stp-43201801.
17. Borovik, A.V. Statistical studies of duration of low-power solar flares / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – V. 4, № 2. – P. 8–16. – DOI: 10.12737/stp-41201803.

18. Borovik, A.V. Statistical studies of low - power flares. Distribution of flares by area, brightness, and classes / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2017. – V. 3, № 1. – P. 40–56. – DOI: 10.12737/22486.
19. Borovik, A.V. Statistical research into low-power solar flares. Main phase duration / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2017. – V. 3, № 4. – P. 5–16. – DOI: 10.12737/szf-34201701.
20. Borovik, A.V. Construction of the light curves for solar flares in the Ha line / A.V. Borovik, P.A. Konyaev, A.A. Zhdanov // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2016. – V. 56, № 5. – P. 513–523. – DOI: 10.1134/S0016793216050029.
21. Borovik, A.V. Structure and Development of the Spotless Flare on March 16, 1981 / A.V. Borovik, D.Yu. Myachin // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2010. – V. 50, № 8. – P. 937–949. – DOI: 10.1134/S0016793210080037.
22. Borovik, A.V. The structure and development of solar flares outside sunspots / A. V. Borovik, D. Yu. Myachin // *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers: Proc. of the 10th European Solar Physics Meeting. 9-14 Sept., 2002*. – Prague, Czech Republic. – 2002. – V. 2. – P. 553–556. – (ESA SP-506).
23. Borovik, A.V. The manifestation of supergranulation structures of active regions during solar flares / A.V. Borovik // *Adv. Space Res.* – 1988. – V. 8, № 11. – P. 141–144. – DOI: 10.1016/0273-1177(88)90308-0.
24. Borovik, A.V. The spotless flare of 16 March 1981. I. Preflare activations of the chromospheric fine structure / A.V. Borovik, D.Yu. Myachin // *Solar Physics*. – 2002. – V. 205, № 1. – P. 105–116. – DOI: 10.1023/A:1013859722017.
25. Konyaev, P.A. Analysis of structure and development of spotless flares using digital images of the solar chromosphere / P.A. Konyaev, A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // *Atmos. Ocean Opt.* – 2016. – T. 29. – P. 89–94. – DOI: 10.1134/S1024856016010103.
26. Konyaev, P.A. Studying the astroclimate at Baikal Astrophysical Observatory by optical methods / P.A. Konyaev, A.V. Borovik // *Atmos. Ocean Opt.* – 2014. – T.27. – P. 130-133. – DOI: 10.1134/S1024856014020109.
27. Maksimov, V.P. An investigation of the subflare-microwave burst connection / V. P. Maksimov, G. N. Zubkova, A. V. Borovik // *Astronomische Nachrichten*. – 1990. – V. 311, № 5. – P. 299–303. – DOI: 10.1002/asna.2113110511.

Иные публикации:

28. Банин, В.Г. Комплексы активности на 1705-1709 оборотах / В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев // *Солнечные данные*. – 1988. – № 5. – С. 82–88.

29. Банин, В.Г. Большие солнечные вспышки 13 и 16 мая 1981 г. / В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1983. – Вып. 65. – С. 151–164.
30. Банин, В.Г. Об астроклимате Байкальской астрофизической обсерватории / В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев, В. Д. Трифонов // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1982. – Вып. 60. – С. 28–34.
31. Боровик А.В. Солнечные вспышки малой мощности в линии $H\alpha$: результаты исследований / А. В. Боровик // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. – 2023. – Т. 119, № 1. – С. 27–41.
32. Боровик, А.В. Результаты многолетних исследований вспышек малой мощности на Солнце / А. В. Боровик // Труды Международной научной конференции Иркутск, 6–8 апреля 2022 г. «Россия и Монголия: результаты и перспективы научного сотрудничества». – 2022. – С. 227–230. – DOI: 10.53954/9785604859506.
33. Боровик, А.В. Динамика лент эмиссии вспышек – индикатор процессов выделения энергии в токовых слоях / А. В. Боровик // Избранные проблемы астрономии: Материалы III Всероссийской астроном. конф. «Небо и Земля», Иркут. гос. ун-т, Ирк. – 2016. – С. 112–119.
34. Боровик, А.В. Модель внепятенной вспышки / А.В. Боровик, Д.Ю. Мячин, А.М. Уралов // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. – 2016. – Т. 112, № 1. – С. 38–46.
35. Боровик, А.В. Вспышки вне пятен: наблюдения и интерпретация / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин, В. М. Томозов // Физика Солнца и околоземного космического пространства. Труды Всеросс. конф., посв. 100-летию со дня рождения чл.-корр. РАН В. Е. Степанова. 16-21 сентября 2013 г., Иркутск. ИСЗФ СО РАН. – 2014. – С. 29–34.
36. Боровик, А.В. Изучение астроклимата Байкальской Астрофизической Обсерватории по измерениям качества изображений солнечной хромосферы в линии $H\alpha$ / А. В. Боровик, П. А. Коняев // Физика Солнца и околоземного космического пространства. Труды Всеросс. конф., посв. 100-летию со дня рождения чл.-корр. РАН В. Е. Степанова. 16-21 сентября 2013 г., Иркутск. ИСЗФ СО РАН. – 2014. – С. 25–28.
37. Боровик, А.В. Цифровая обработка изображений в задачах солнечной физики / А. В. Боровик, П. А. Коняев, Д. Ю. Мячин, Е. А. Тартаковский // XVII Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 28 июня-1 июля 2011 г., г. Томск: сб. трудов: электр. науч. публикация. – Томск: ИОА СО РАН – 2011. – С. В50–В53. CD-ROM.

38. Боровик, А.В. Внепятенная вспышка 16 марта 1981 г. I. Предвспышечные активизации тонкой структуры хромосферы / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 2001. – Вып. 113. – С. 89–96.
39. Боровик, А.В. Центры вспышечной активности в максимуме и на спаде цикла солнечной активности / А. В. Боровик, Е.М. Голубева // Труды конф. «Современные проблемы солнечной активности». ГАО, Санкт-Петербург. – 1997. – С. 261–265.
40. Боровик, А.В. Пространственно-временные характеристики малых солнечных вспышек в активных областях с крупными вспышками / А. В. Боровик // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1994. – Вып. 102. – С. 118–133.
41. Боровик, А.В. Статистические параметры и элементы тонкой структуры малых солнечных вспышек / А.В. Боровик // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1994. – Вып. 102. – С. 161–177.
42. Боровик, А.В. Центры вспышечной активности групп солнечных пятен / А. В. Боровик // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1994. – Вып. 102. – С. 133–152.
43. Боровик, А.В. Геоэффективность центров солнечной активности / А. В. Боровик, Л. В. Боровик, В. А. Пархомов // Астрон. циркуляр. – 1989. – № 1541. – С. 17–18.
44. Боровик, А.В. Малые солнечные вспышки и предвспышечные активизации хромосферных структур / А. В. Боровик // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1989. – Вып. 87. – С. 154–166.
45. Боровик, А.В. Малые солнечные вспышки и центры вспышечной активности / А. В. Боровик, Л. В. Боровик // Астрон. циркуляр. – 1989. – № 1541. – С. 15–16.
46. Боровик, А.В. Активизация хромосферных структур перед малыми солнечными вспышками / А. В. Боровик // Астрон. циркуляр. – 1988. – № 1529. – С. 19–20.
47. Боровик, А.В. Эволюция активной области СД № 135 в июне 1984 г. и ее связь с крупномасштабными полями на Солнце / А. В. Боровик, В. М. Григорьев, Н. Н. Кардаполова, В. Е. Меркуленко и др. // Contributions of the Astronomical observatory Skalnaté Pleso: proc. 12th Regional Consultation on Solar Physics (Smolenice, May 19-24, 1986). Tatranska Lomnica. – 1986. – V. XV, Pt.1. – P. 211–242.
48. Боровик, А.В. Малые солнечные вспышки в активной области N135 СД 23 июня 1984 г. / А. В. Боровик // Астрон. циркуляр. – 1985. – № 1413. – С 2–4.

49. Боровик, А.В. Малые солнечные вспышки в комплексе активности / А. В. Боровик // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1985. – Вып. 73. – С. 28–37.
50. Саттаров, И.С. О развитии вспышечной активности группы солнечных пятен СД N135 (1984) / И. С. Саттаров, М. Б. Огирь, А. Б. Делоне, А. В. Боровик // Астрон. циркуляр. – 1985. – № 1413. – С 1–2.
51. Banin, V.G. Complex of activity and large solar flares / V. G. Banin, A. V. Borovik, S. A. Yazev // Contributions of the Astronomical observatory Skalnaté Pleso: proc. 12th Regional Consultation on Solar Physics (Smolenice, May 19-24, 1986). Tatranska Lomnica. – 1986. – V. XV, Pt. 1. – P. 289–296.
52. Borovik, A.V. Solar flares and the supergranulation structure of active regions / А. В. Borovik // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 1990. – Вып. 91. – С. 63–73.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Боровик, А.В. Эволюция активной области СД N135 в июне 1984 г. и ее связь с крупномасштабными полями на Солнце / А.В. Боровик, В.М. Григорьев, Н.Н. Каргаполова и др. (всего 32 автора) // Contributions of the astronomical observatory Skalnaté Pleso. – 1986. – V. 15, Pt. 1. – P. 211–242.
2. Курочка, Л.Н. Энергия излучения оптических солнечных вспышек, I. / Л. Н. Курочка, Л. А. Стасюк // Солнечные данные. – 1981а. – № 5. – С. 83–91.
3. Курочка, Л.Н. Энергия излучения оптических солнечных вспышек, II. / Л. Н. Курочка, В.М. Россада // Солнечные данные. – 1981б. – № 6. – С. 78–83.
4. Курочка, Л.Н. Энергия излучения оптических солнечных вспышек, III. / Л. Н. Курочка, В.М. Россада // Солнечные данные. – 1981в. – № 7. – С. 95–100.
5. Смит, Г. Солнечные вспышки / Г. Смит, Э. Смит. – М.: Мир, 1966. – 426 с.
6. Язев, С.А. О тонкой структуре АО 135/84 СД / С.А. Язев // Астрономический циркуляр. – 1985. – № 1412. – С. 5–7.
7. Borovik, A.V. The processes of energy release in low-power solar flares / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2019. – V. 4, № 4. – P. 8–16. – DOI: 10.12737/stp-41201803.
8. Borovik, A.V. Statistical studies of duration of low-power solar flares / A.V. Borovik, A.A. Zhdanov // Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – V. 4, № 2. – P. 8–16. – DOI: 10.12737/stp-41201803.
9. Dodson, H.W. Some comments on flares after many years of observation. / H. W. Dodson, E. R. Hedeman // Solar Phys. – 1976. – V. 47. – P. 267–275. – DOI: <https://hdl.handle.net/2027.42/43743>.

10. Falciani, R. Analysis of some aspects of 25 chromospheric events. II. Discussion on optical data / R. Falciani, M. Rigutti // Solar Phys. – 1972. – V. 26. – P. 114–116.
11. Grigoryev, V.M. Structure and dynamics of convective motions in the active region (June 1984) during its appearance and development / V.M. Grigoryev, V.L. Selivanov // Contributions of the Astronomical observatory Skalnaté Pleso. – 1986. – V. 15, Pt. 1. – P. 87–103.
12. Mitra, R.K. Some studies on solar optical flares reported under new classification / R.K. Mitra, S.R. Sarkar, M.K. Das Gupta // Indian J. Radio and Space Phys. – 1972. – V. 1. – P. 170–174.
13. Simon, G.W. Velocity fields in the Solar Atmosphere. III. Large-scale motions the chromospheric network and magnetic fields. / G.W. Simon, R.B. Leighton // Astrophys.J. – 1964. – V. 140. – P. 1120–1147.
14. Solar Geophys. Data. 1983. Pt. 1, January, N 461. P. 30.
15. Svestka, Z. Study of the post-flare loops on 1973 July 29 – Part Four – Revision of T and NE values and comparison with the Flare of 1980 MAY 21 / Z. H. W. Dodson-Prince, S. F. Martin, O. C. Mohler, R. L. Moore, J. T. Nolte, R. D. Petrasso // Solar Phys. – 1982. – V. 78, № 2. – P. 271–285. – DOI: 10.1007/BF00151609.
16. Temmer, M. Statistical analysis of solar H α flares / M. Temmer, A. Veronig, A. Hanslmeier, W. Otruba, M. Messerotti // Astron. and Astrophys. – 2001. – V. 375. – P. 1049–1061. – DOI: 10.1051/0004-6361:20010908.
17. Woods, T.N. Contributions of the solar ultraviolet irradiance to the total solar irradiance during large flares / T. N. Woods, G. Kopp, P. C. Chamberlin // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111, № A10. – P. 1–10 – DOI: 10.1029/2005JA011507.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № _____ г.

Объем _____ с. Тираж _____ экз.