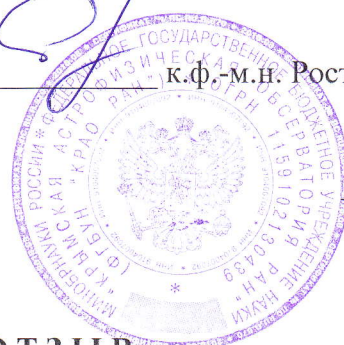


Утверждаю

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Крымская астрофизическая
обсерватория РАН» (КраО РАН)



к.ф.-м.н. Ростопчина-Шаховская А.Н.



13

сентября 2024 г.

О Т З Ы В

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»
на диссертацию

Боровика Александра Васильевича

«Солнечные вспышки малой мощности в линии Na»,

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Актуальность темы

Солнце – это ближайшая к нам звезда, активность которого определяет космическую погоду и оказывает существенное влияние на биосферу и техносферу Земли. Вследствие этого изучение Солнца имеет не только большое фундаментальное, но и прикладное значение.

В настоящее время не вызывает сомнений, что вспышечное энерговыделение происходит вследствие преобразования свободной энергии магнитного поля в нагрев плазмы, ускорение заряженных частиц и крупномасштабные магнитогидродинамические движения вещества на разных уровнях солнечной атмосферы. Однако до сих пор нет ясных представлений о механизмах накопления и выделения энергии в солнечных вспышках. Вплоть до конца семидесятых годов считалось, что первичный источник энерговыделения вспышек находится на уровне хромосферы Солнца. Однако по мере развития внеатмосферных наблюдений стало очевидным, что гораздо значимей вспышки проявляют себя не только в микроволновом, но и в рентгеновском и ультрафиолетовом

диапазоне. Более того, появилось много наблюдательных данных, свидетельствующих о важной роли нетепловых процессов в короне Солнца. Это привело к появлению так называемой стандартной модели солнечной вспышек, согласно которой вспышечные явления в хромосфере и фотосфере Солнца являются вторичными процессами, обусловленными «высыпанием» ускоренных в короне заряженных частиц. Вследствие этого интерес к оптическим наблюдениям в значительной мере ослаб. Однако по мере совершенствования наземных и космических телескопов, приемной аппаратуры и методов наблюдений в разных волновых диапазонах стало ясным, что далеко не все вспышечные явления могут быть объяснены в рамках стандартной модели. Более того, без понимания физики нестационарных процессов в хромосфере Солнца невозможно до конца понять всю совокупность вспышечных явлений. При этом чрезвычайно важно детально исследовать вспышечные события малой мощности, которые происходят в областях с более простой магнитной конфигурацией, и, ввиду их многочисленности, позволяют сделать статистически обоснованные общие выводы. Не следует исключать, что лишь при таком подходе можно выяснить природу фундаментальных вспышечных процессов, связанных с перестройкой магнитного поля, механизмами ускорения заряженных частиц и нагрева солнечной короны. Более того, в последнее время большой резонанс в мировом научном сообществе получила проблема HOPE (Hot Onset Precursor Event), согласно которой преднагрев вспышечной плазмы до температур $> 10^7$ К происходит в основаниях корональных петель, и это может служить необходимым условием развития импульсной фазы солнечных вспышек.

С учетом вышесказанного, актуальность диссертационной работы Боровика Александра Васильевича, посвященной изучению слабых хромосферных вспышечных событий в линии H α , сомнений не вызывает.

Научная новизна и значимость работы

Отметим результаты, которые были получены диссертантом впервые.

1. Впервые по данным Международной службы Солнца (более 120000 вспышек) за 1972-2010 гг. установлено, что более 90% вспышек на Солнце относятся к вспышкам малой мощности, число которых по мере уменьшения их энергии возрастает.
2. Впервые показано, что энергия малых по площади вспышек может быть сопоставима с энергией крупных солнечных событий. При этом в интервал энергий крупных солнечных вспышек (оптические классы 2-4) попадает до 9.5% вспышек малой мощности.

3. Впервые изучены характеристики вспышек семи типов: взрывного типа; внепятенных; двухленточных; событий с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области; вспышек с двумя и более центрами; событий с неоднократными всплесками интенсивности вспышек, сопровождающихся высокоскоростными темными волокнами, что может быть использовано для их классификации.
4. Обнаружена высокая корреляция между временем подъема яркости в линии $H\alpha$ к максимуму и продолжительностью события. Получены указания, что отношение времени подъема к продолжительности вспышки может носить дискретный характер.
5. Установлено, что вспышки малой мощности могут сопровождаться потоками протонов и рентгеновским излучением разной интенсивности.
6. Показано, что в областях Солнца, где происходят интенсивные выходы магнитных потоков малые вспышки возникают значительно чаще и здесь формируются центры вспышечной активности.
7. Впервые обращено внимание, что рентгеновское излучение появляется в среднем на две минуты раньше оптического, достигая максимума приблизительно на одну минуту позже максимума излучения в линии $H\alpha$.
8. Впервые на большом статистическом материале сделан вывод, что малые вспышки почти не встречаются на участках активной области, где возникают и развиваются крупные солнечные события.
9. Установлено, что внепятенные вспышки, как и вспышки групп пятен, возникают на границе хромосферной сетки активных и спокойных областей.
10. Получены убедительные свидетельства о возникновении малых вспышечных событий вблизи локальных короткоживущих линий раздела полярности продольного магнитного поля, где его градиент достигает 1.3-1.5 Гс/км.
11. Приведены веские аргументы, что вспышки малой мощности как и крупные вспышки сопровождаются активизациями хромосферных структур разных масштабов. При этом крупномасштабные активизации проявляют себя за 40-50 мин до начала малых вспышек и прослеживаются за пределами активной области до расстояний 220000 км. В свою очередь, мелкомасштабные активизации наблюдаются за 10-20 мин до вспышки в пределах одного-двух ярусов супергрануляционных ячеек.
12. Получены новые свидетельства о том, что вспышки малой мощности в линии $H\alpha$ не отличаются от крупных вспышек по характеру развития. Им, как и во втором

случае, предшествуют активизации и исчезновения волокон; они могут появляться в активной области над тенью солнечных пятен, иметь взрывную фазу и неоднократные всплески интенсивности. Среди них встречаются двухленточные, внепятенные и белые вспышки.

13. Впервые получены указания, что причиной возмущений хромосферы как в спокойных, так и активных областях Солнца могут являться крупномасштабные изменения магнитных полей.

14. Особо хотелось бы отметить, что полученные диссертантом результаты убедительно демонстрируют необходимость дальнейшего проведения более детальных исследований нестационарных процессов в солнечной хромосфере ввиду очевидной связи между выходом нового магнитного потока на поверхность Солнца и вспышечным энерговыделением.

Научная и практическая значимость работы определяется созданием новых численных методов обработки наблюдательных данных, программного обеспечения, повышающего эффективность исследований в разных диапазонах длин волн, дальнейшим развитием методов прогноза солнечной активности. Полученные результаты расширяют наши знания о нестационарных явлениях в атмосфере Солнца и могут быть использованы для построения физических моделей процессов вспышечного энерговыделения. Их рекомендуется использовать в ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, КрАО РАН и во многих других отечественных и зарубежных астрономических организациях.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием большой выборки наблюдательных данных, которая включает оригинальные наблюдения, и применением современных методов их обработки. Она подтверждена их признанием при обсуждении на семинарах, международных и всероссийских конференциях, согласованностью с наблюдениями других авторов и публикациями в рецензируемых российских и международных журналах. Достоверность результатов зиждется также на большом научном опыте диссертанта и основательном фундаменте, заложенном основоположниками советской школы, получившей мировое признание.

Личный вклад автора

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором лично или при его непосредственном участии. Диссертант внес определяющий вклад в постановку задач и разработку методов их исследования, и интерпретацию полученных наблюдений. Особо следует отметить личный вклад автора, связанный с выборкой и обработкой разнородных данных наземных и космических телескопов. Необходимо также подчеркнуть, что диссертант использовал наблюдательные материалы, полученные им и его коллегами на хромосферном телескопе полного диска Солнца Байкальской астрофизической обсерватории. Самостоятельно изучал связь малых вспышек с хромосферными структурами, а также вопросы, связанные с пространственно-временной группировкой вспышек малой мощности в центрах вспышечной активности. Автором разработаны новые принципы построения световых кривых солнечных вспышек в линии Na и метод обнаружения очагов повышенной активности солнечных вспышек малой мощности. Диссертант принимал равное участие в подготовке публикаций и представлял устные и стендовые доклады на международных и всероссийских конференциях.

Замечания по диссертационной работе

Среди замечаний хотелось бы отметить следующие.

1. Из текста диссертации не совсем ясно, являются ли понятия «малые вспышки» и «вспышки малой мощности» эквивалентными, т.е. вспышками, которые обладают энергией в оптическом излучении $\sim 10^{29}$ эрг и площадью менее 2 кв. град.
2. Диссертант под энергией вспышки подразумевает энергию излучения в оптическом диапазоне. Однако не следует исключать, что основная часть энергии вспышки сосредоточена в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении. Связь между мощностью вспышки в различных диапазонах для рассматриваемых отдельных событий, по крайней мере, требует более детального обсуждения.
3. Автор уделил мало внимания эффекту Нойперта, лежащему в основе стандартной модели солнечной вспышки, согласно которому оптическое излучение скорее на несколько минут должно опережать мягкое рентгеновское, обусловленное испарением хромосферного вещества, что несколько противоречит полученным результатам.
4. В диссертационной работе вопрос об относительной роли крупномасштабных и мелкомасштабных магнитных полей в процессе вспышечного энерговыделения так

и остался без внимания, хотя его анализ мог бы пролить свет на природу предвестников солнечных вспышек.

5. Автором практически не проводится сравнение изображений узлов и вспышечных лент в линии Na с рентгеновскими и ультрафиолетовыми изображениями, полученными на космических обсерваториях *Yohkoh*, *TRACE*, *RHESSI* и *SDO/AIA*, что, на наш взгляд, может оказаться весьма полезным.
6. Некоторые подписи к рисункам не содержат ссылки на публикации, из которых они взяты, хотя в основном тексте они и приводятся. Кроме того, надписи иногда представляются слишком мелкими, что делает затруднительным их восприятие в распечатанном виде (см., например, Рис. 2.29).
7. Несмотря на то, что текст диссертации хорошо оформлен и детально проработан, все же имеются небольшие погрешности. Так, например, на стр.95 содержится ссылка на несуществующую Табл. 2.24.

Отмеченные выше замечания ни в коей мере не умаляют значимость полученных автором результатов, а наиболее существенные из них могут быть им учтены в дальнейших публикациях. Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить ясное и последовательное изложение представляемого материала, несмотря на широкий охват самых разных проблем. Автор, используя оригинальное программное обеспечение сумел провести детальный анализ более 120 000 солнечных событий за 1972-2010 гг., включая вспышки, наблюдаемые как на хромосферном телескопе Байкальской астрофизической обсерватории, так и инструментах Международной службы Солнца. Объем проделанной автором кропотливой, но важной работы огромен и не может не вызывать уважения.

Заключение

По теме диссертации опубликовано 52 работы, в том числе 27 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации, 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, двадцать четыре публикации – в прочих научных изданиях. Результаты, полученные диссертантом, представляют интерес для дальнейшего развития теории активности Солнца, солнечных вспышек и их краткосрочного прогноза. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Автор привлек большой объем данных, полученных на космических и наземных телескопах, включая оригинальные наблюдения. Материал диссертации изложен грамотно и последовательно, и может представлять

интерес как для начинающих исследователей, так и специалистов самой высокой квалификации. По каждой главе имеются выводы. Автореферат, в котором представлены основные этапы и результаты исследования, соответствует содержанию работы.

Диссертация представляет собой завершённый научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему. По своей новизне, научно-практической значимости диссертация Боровика Александра Васильевича на тему «Солнечные вспышки малой мощности в линии Na» полностью соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней» (пункты 9-14), утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановлений Правительства РФ № 335 от 21.04.2016, от 01.10.2018 № 1168), а сам автор, Боровик Александр Васильевич, достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия.

Отзыв составил доктор физ.-мат. наук (диссертация защищена по специальности 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия) ведущий научный сотрудник Отдела физики Солнца и Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» Цап Юрий Теодорович. Отзыв обсужден и одобрен на объединенном семинаре КраО РАН 10 сентября 2024 г.

Доктор физико-математических наук



Цап Ю.Т.

Телефон: +79780204196

E-mail: yur_crao@mail.ru

Информация об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (КраО РАН)

пгт Научный

Бахчисарайский р-н.

Республика Крым, 298409

Телефон: +7-(36554)-71161

E-mail: crao@inbox.ru

Веб-сайт: <https://crao.ru>