

Отзыв

официального оппонента Слемзина Владимира Алексеевича на диссертацию Боровика Александра Васильевича «Солнечные вспышки малой мощности в линии H α », представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация А.В. Боровика посвящена изучению малых по мощности солнечных вспышек с энергией $\sim 10^{29}$ эрг, происходящих на уровне хромосферы и регистрируемых в линии водорода H α . Экспериментальные и теоретические исследования солнечных вспышек представляют собой фундаментальное направление солнечной физики, связанное с общей энергетикой Солнца и практически важное для понимания солнечно-земных связей. Интерес к изучению вспышек малой мощности обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, их частота существенно (в десятки раз) выше более мощных ультрафиолетовых и рентгеновских вспышек, происходящих в солнечной короне, и они отражают процессы передачи энергии из самых нижних слоев солнечной атмосферы в разных фазах солнечной активности. Во-вторых, изучение особенностей этих вспышек важно с точки зрения установления их механизмов и связи с более мощными активными процессами, рассматриваемыми при прогнозировании космической погоды. Фундаментальной задачей, поставленной автором в диссертации, является исследование статистических характеристик солнечных вспышек малой мощности в оптическом и рентгеновском диапазонах, сравнительный анализ характеристик малых и мощных солнечных вспышек на обширной базе многолетних наблюдений и выяснение сходства и различий их физических механизмов. Таким образом, как в теоретическом, так и в практическом плане постановка задачи и ее реализация в диссертации актуальны и соответствуют приоритетным направлениям Программы фундаментальных исследований РАН на период до 2030 г. (1.3.7.4 – Солнце, 1.3.7.6 – Развитие методов наземной и внеатмосферной астрономии).

Диссертация А.В. Боровика состоит из Введения, 5 глав, Заключения, списка литературы и 7 приложений.

В первой главе диссертации приводится подробный обзор наземных и космических наблюдений солнечных вспышек, в котором детально рассматриваются классификация вспышек по энергии и мощности, физические модели, связь с солнечными пятнами, включая мощные оптические, ультрафиолетовые и рентгеновские вспышки, вспышки малой

мощности в линии $H\alpha$, а также такие мелкомасштабные явления, как рентгеновские яркие точки, микровспышки и нановспышки. Исторический обзор охватывает период от первых работ 1950х годов до современных теорий 21го века, в которых анализируются наблюдения на космических аппаратах и наземных обсерваториях.

Вторая глава посвящена статистическому анализу временных, пространственных и энергетических характеристик солнечных вспышек малой мощности в линии $H\alpha$. Наблюдение таких вспышек имеет свои особенности. Качество данных измерений в линии $H\alpha$ зависит от точности настройки интерференционных фильтров, учета проекционных эффектов и временного разрешения детектора, то есть требует постоянного совершенствования инструментов. Для статистического анализа автор критически изучил существующие источники данных, полученных в 21–24 солнечных циклах с 1972 по 2010 г., и сформировал уникальную базу данных, включающую более 123 тысяч вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах, из которых более 110 тысяч (более 90%) относятся к вспышкам малой мощности. При этом были откорректированы класс площади вспышки, класс яркости, время начала, максимума, окончания и другие параметры. Каталог всех изученных вспышек за 1972-2017 г.г. опубликован на сайте Всемирного Центра солнечно-земной физики Российской Академии наук. Показано, что временное распределение вспышек малой мощности в высокой степени (0.9 и более) скоррелировано с солнечной активностью (числа Вольфа). Подробно изучена статистика вспышек по площади, классам яркости и баллам. Особо следует отметить сравнительный анализ малых по мощности вспышек, излучающих в оптическом и рентгеновском диапазонах. Показано, что высокая корреляция существует практически между всеми классами оптических вспышек и рентгеновским излучением, однако она уменьшается с ростом рентгеновского класса от C до X. С помощью разработанного автором метода идентификации оптических и рентгеновских вспышек показано, что начало вспышек в рентгене опережает начало в оптическом диапазоне в среднем на 2 мин. Установлено, что вспышки малой мощности, как и мощные солнечные вспышки, могут сопровождаться потоками протонов и излучением разной мощности в рентгеновском диапазоне (в том числе класса X).

В третьей главе рассмотрены пространственное и временное распределения вспышек малой мощности по диску Солнца, их локализация по отношению к солнечным пятнам, активным областям и хромосферным структурам. Центры вспышечной активности малых по мощности вспышек

расположены в областях выходов мощных магнитных потоков и существуют до 9 суток с возвратом через 1-5 оборотов. Установлено, что предположение о возрастании частоты вспышек малой мощности перед крупными мощными вспышками, выдвинутое ранее в качестве прогноза, не подтверждается. Уровень активности маломощных вспышек связан не с развитием крупных вспышек, а с эволюцией активных областей.

В главе 4 рассмотрены результаты наблюдений вспышек малой мощности в линии $H\alpha$, проведенных с участием автора на Байкальской астрофизической обсерватории. Описаны параметры и наблюдательные характеристики двух хромосферных телескопов БАО – телескопа $H\alpha$ (действует с 1980х годов) и телескопа $CaII K$, программный алгоритм, позволяющий получить изображения деталей хромосферы в узких спектральных линиях с угловым разрешением до $1''$. Автором разработаны программы обработки изображений для исправления на плоское поле, калибровки яркости, компенсации вращения Солнца, автоматического выделения протуберанцев, совмещения с картой магнитного поля и др. По данным, полученным с помощью указанных телескопов и методик, подробно описана морфология маломощных вспышек в линии $H\alpha$, их привязка к хромосферной сетке и супергрануляционной структуре активных областей, а также процессы предвспышечной активизации хромосферных волокон. Представлены результаты, отражающие связь вспышечной активности с динамикой магнитного поля, полученные в разные периоды, начиная с 1980х годов и до сентября 2017 г. Важным выводом этой главы представляется заключение о том, что малые по мощности $H\alpha$ вспышки появляются во время всплытия магнитных потоков и локализуются вблизи мелкомасштабных короткоживущих линий раздела полярностей с высоким градиентом магнитного поля.

В главе 5 описываются результаты изучения внепятенных солнечных вспышек, возникающих в спокойных областях Солнца. Особенностью таких областей является присутствие развитой тонкой структуры хромосферы, которая четко реагирует на изменения фотосферного магнитного поля и не проявляется в группах пятен. Относительно простая конфигурация магнитного поля при внепятенных вспышках дала возможность провести детальное сопоставление наблюдений нескольких вспышек со стандартной теоретической моделью CSHKP, которое показало, что модель дает неплохое представление развития хромосферных вспышек на стадии расхождения вспышечных лент, но не соответствует данным наблюдений начальной и

импульсной фаз вспышки. По приведенным в этой главе результатам сделаны выводы о существовании предвспышечных хромосферных возмущений, вызываемых крупномасштабными изменениями магнитных полей спокойных областей, а также заключение, что события и явления, сопровождающие внепятенные вспышки, аналогичны наблюдаемым во время вспышек в группах солнечных пятен.

В Заключение суммированы выводы из результатов исследования. Основной вывод состоит в том, что вспышки малой мощности в линии $H\alpha$ с точки зрения особенностей развития не отличаются от крупных вспышек, однако наблюдаемое сходство с более мощными вспышками не дает достаточных оснований судить о единстве механизмов возникновения вспышек разной мощности.

В дополнение к основному тексту диссертации, в приложениях приведены таблицы и графики, более детально характеризующие использованные в работе данные.

Объем диссертации составляет 322 страницы, включая 191 рисунок, 38 таблиц, 7 приложений. Список цитируемой литературы включает 280 наименований.

Все результаты диссертации опубликованы в 52 статьях, вышедших в рецензируемых научных изданиях и трудах специализированных конференций, в том числе, в 27 статьях, включенных в список ВАК и индексируемых в международных библиографических базах. Автореферат соответствует тексту диссертации и позволяет достоверно судить об ее качестве.

Новизна работы состоит в том, что впервые проведен подробный анализ и теоретическая интерпретация значительного по объему экспериментального материала о малых по мощности солнечных вспышках в линии $H\alpha$, перекрывающего 3 цикла солнечной активности, и получены новые результаты, необходимые для понимания физической природы вспышечной активности. В работе детально изучены параметры малых по мощности $H\alpha$ вспышек, в том числе, их разнообразные конфигурации, энергетические, пространственные и временные характеристики в соотношении с конфигурацией солнечных структур, магнитных полей, другими типами солнечных вспышек, и определено их место в общей картине вспышечной активности Солнца.

Примененные в работе методы исследования, в том числе методы статистического анализа, современны и полностью отвечают поставленным

задачам. В процессе работы автором созданы оригинальные методики обработки и анализа данных, проведена теоретическая интерпретация результатов и показана ограниченность существующих моделей в применении к данному типу вспышек.

Обоснованность и достоверность представленных в диссертации результатов исследования не вызывает сомнений. Выводы подтверждаются статистическим анализом, сопоставлением с известными из других работ результатами и теоретическими моделями, а также апробацией на 45 международных и отечественных научных конференциях, симпозиумах и совещаниях.

Все защищаемые положения конкретны, выражают существенные особенности исследуемых явлений и соответствуют результатам работы. Вместе с тем, есть два замечания по стилю формулировок. Первое положение было бы логично разделить на два отдельных утверждения: о морфологических особенностях малых по мощности вспышек и о соотношении между оптическим и рентгеновским излучением вспышек, поскольку эти части содержат различную физически значимую информацию. Второе положение содержит утверждение: «вспышки малой мощности в местах интенсивного выхода магнитных потоков образуют плотные скопления», тогда как правильнее было бы утверждать, что «вспышки малой мощности наиболее часто происходят в местах интенсивного выхода магнитных потоков». В этом же положении: снижение активности малых вспышек перед крупными вспышками правильнее объяснить не условием, а следствием накопления энергии магнитным полем АО.

Практическое значение работы состоит в создании методик обработки солнечных изображений для выделения слабых нестационарных явлений, выполнении детального описания маломощных оптических вспышек, расширяющего многообразие проявлений солнечной активности, а также в создании перспектив использования оптических наблюдений в линии Na для прогнозирования вспышечной активности Солнца и потоков солнечного ветра.

Личный вклад автора является определяющим в постановке задач и разработке научных принципов исследования, разработке алгоритмов обработки данных, изучении особенностей локализации и развития вспышек, подготовке основных публикаций. В части исследований, выполненных в соавторстве, в том числе в наблюдениях на хромосферном телескопе полного диска Солнца Байкальской астрофизической обсерватории и интерпретации

полученных результатов, вклад автора, является существенным. Все заимствованные материалы отмечены необходимыми ссылками на источники.

В качестве замечаний к оформлению и тексту диссертации следует отметить следующее.

1. Указанная в диссертации формулировка цели работы «исследование вспышечных процессов в относительно простом их проявлении» не отражает в должной мере тему диссертации, сформулированную в ее названии, и перечень задач, которые решались в работе.
2. Замечание по терминологии. Во введении указано, что рассматриваемые в работе явления относятся к вспышкам малой мощности, но при этом указан порог не по мощности, а по энергии $\sim 10^{29}$ эрг. Следовало бы уточнить, какова условная граница мощности, при которой такие вспышки считаются малыми.
3. При подсчете чисел вспышек с разными параметрами на стр. 15 и 56 ошибочно указано что класс S – это вспышки малой мощности в то время, как такое обозначение по определению относится к вспышкам малой площади (Subflares).
4. В общем обзоре солнечных вспышек (глава 1) и при сопоставлении маломощных вспышек в линии H α с рентгеновскими вспышками (глава 2), к сожалению, отсутствует информация о минимальных по мощности рентгеновских вспышках на 2 порядка меньше уровня чувствительности GOES, исследованных в 2009 г. с помощью прибора SPHINX на спутнике Коронас-Фотон (см., например, Gryciuk, M., Siarkowski, M., Sylwester, J. et al. Flare Characteristics from X-ray Light Curves. 2017, Sol. Phys. 292, 77; каталог таких вспышек http://www.cbk.pan.wroc.pl/mg/SphinX_fl.html). По мощности такие вспышки как раз могут соответствовать рассматриваемым в работе вспышкам в линии H α .
5. В тексте диссертации имеются немногочисленные опечатки на стр. 95, 98, 132, 142, 151, 233.

Приведенные выше замечания не снижают высокого качества представленной к защите диссертации, которую можно оценить как значительное научное достижение, вносящее большой вклад в исследование вспышечной активности Солнца и содержащее богатый экспериментальный материал для дальнейшего теоретического анализа. Результаты могут быть использованы специалистами ИСЗФ СО РАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, Института астрономии РАН, ИЗМИРАН, ГАО РАН, КрАО и других институтов и обсерваторий, занимающихся исследованиями по физике Солнца.

Диссертация А.В. Боровика полностью отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям согласно действующему Положению о присуждении ученых степеней Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, паспорту специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, и заслуживает присуждения соискателю – Александру Васильевичу Боровику ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Отделения оптики ФИАН,

Слемзин Владимир Алексеевич

“ 2 “ сентября 2024 г.

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Тел. +7(916) 925 5768, Email slemzinva@lebedev.ru

Научная специальность докторской диссертации В.А. Слемзина 01.04.05 – оптика.

Подпись В.А. Слемзина заверяю

Ученый секретарь Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,



Колобов Андрей Владимирович