

ОТЗЫВ

официального оппонента о работе **Боровика Александра Васильевича «СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ЛИНИИ Н α »**, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Исследования солнечных вспышек – традиционное направление современной физики Солнца. Основное внимание привлекают наиболее энергичные из них, с энергиями до 10^{32} эрг и более, ввиду возможных геоэффективных проявлений. Некоторую интригу представляют вспышки на солнцеподобных звездах, на которых наблюдаются вспышки с энергиями, еще на несколько порядков большими солнечными. Ранее устойчивым было выражение «хромосферные вспышки», поскольку они наблюдались как резкие уярчения в хромосферной линии Н-альфа. Теперь, главным образом после начала космической эры, мы принимаем, что основная локализация вспышки происходит в более высоких частях солнечной атмосферы, чем хромосфера. Однако, мы знаем, что формирование магнитной структуры – источника высокоэнергичного события – происходит в фотосфере, а само событие – в короне. Таким образом, хромосфера как промежуточный слой играет особую роль для понимания происхождения события. Крупные солнечные вспышки (скажем, рентгеновского класса X) – достаточно редкое явление. В то же время, Солнце производит громадное число слабых вспышек – можно сказать, что вспышки малой мощности составляют численно основную часть вспышечной активности. Но, как ни странно, в последнее время таким событиям на хромосферном уровне уделялось не так много внимания. В последние десятилетия появилась идея о том, что малые вспышки могут продвинуть нас в решении важной старой проблемы: нагрева верхней атмосферы Солнца. Это в значительной степени актуализирует их систематическое изучение. Кроме того, в фундаментальном смысле важно сравнительное изучение свойств вспышек, которые мы называем малыми, и называемых «большими». Все это делает работу **актуальной**.

Докторская диссертация А.В. Боровика, как это следует из названия, как раз посвящена исследованию вспышек малой мощности, главным образом, на уровне, соответствующем излучению в линии Н-альфа.

Структура диссертации: работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Она большая по объему, хорошо иллюстрирована.

Во введении сформулированы цели и задачи работы, обоснована ее актуальность, указаны научная новизна, практическая значимость и степень достоверности результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Остальные необходимые элементы также присутствуют.

В первой главе приводится обширный обзор наших современных знаний и представлений о солнечных вспышках. Обсуждены «старая» классификация вспышек, основанная на наблюдениях в линии Н-альфа, и «новая» – по рентгеновскому излучению, а также фазы вспышек в разных диапазонах волн. Изложены возможные модельные теоретические представления о механизмах вспышек. Отмечу обзор исследований «внепятенных» вспышек, составляющих по численности несколько процентов от общего

количества. В конце главы делается заключение, что природа и роль вспышек малой мощности – объекта исследований в диссертации – еще далека от прояснения, и их изучение важно и актуально.

Глава 2 посвящена статистическим исследованиям параметров вспышек. Рассмотрен обширный материал по вспышкам как в линии $H\alpha$, так и в рентгеновском диапазоне по данным Международного вспышечного патруля и спутников GOES за 1972–2017 гг. Материал очень полезный, однако здесь следует сделать некоторые замечания. На рисунках 2.9, 2.12 и некоторых других распределения частот встречаемости временных характеристик вспышек имеют выраженную негауссовскую форму. Поэтому вычисление среднего арифметического значения и его доверительных пределов по массивам, приведенным на этих рисунках, имеют для интерпретации ограниченный характер. Иллюстрацией этого являются различия типов средних, приводимых в таблицах, начиная с табл.2.6 и далее: медианы, моды и арифметического среднего. Как представляется, было бы интересно здесь провести исследования по аппроксимации вида распределений. Судя по приводимым рисункам возможны самые разные не-гауссовы распределения: Пуассона, Вейбулла, логнормальное. Возможно, такое исследование пролило бы свет на физику процессов. Интересен рис. 2.24. Автор из него делает вывод: «вспышки малой мощности, существенно отличаясь по площади в линии $H\alpha$, могут иметь энергию, сопоставимую в оптическом диапазоне с крупными вспышками». Это, безусловно, следует из рисунка. Но я бы здесь добавил, что распределения по энергиям для оптических вспышек отдельных классов S, 1 и 2-4 близки к логнормальным и образуют отдельные популяции, что может говорить об их физике, различающейся в некоторых деталях. Из результатов главы 2 я бы отметил новый результат о связи времени ветви роста яркости малой вспышки и полной продолжительностью последней. Кроме того, очень весомо выглядит практический результат – базы данных солнечных вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах, содержащие характеристики более ста тысяч вспышек за 1972–2017 гг., опубликованные Мировым Центром Данных РАН.

Глава 3 посвящена исследованию пространственного распределения вспышек малой мощности. Автором установлено, что эти вспышки группируются в центры вспышечной активности и связаны с областями интенсивного выхода магнитных потоков. Эти центры живут от 1.6 до 9 суток, исчезают и затем вновь появляются там же спустя 1–5 солнечных оборотов. Это заключение крайне важно для понимания физических условий формирования предвспышечной ситуации и может пролить свет на генерацию магнитных полей на Солнце. Интересным является полученный факт о понижении встречаемости малых вспышек в областях, где произойдет крупная вспышка, за десятки часов до развития последней: магнитная энергия накапливается перед крупным событием. Здесь отчетливо просматривается практический результат для краткосрочного прогноза крупной вспышки и оценки ее геоэффективности, исходя из положения на видимом диске Солнца.

В Главе 4 описаны основные исследования солнечных вспышек малой мощности по наблюдениям в линии Н-альфа. В начале главы описан применяемый инструментарий: хромосферные телескопы – полного диска и для наблюдения отдельных активных областей. Автор принимал непосредственное участие в отладке и наблюдениях на них. Отмечу, что были усовершенствованы методы обработки изображений Солнца как на электронных, так и

на фотографических носителях. Важным является раздел 4.2, в котором обсуждается уникальный астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории. В разделе 4.4 представлено исследование более 130 малых вспышек. Важными заключениями представляются результаты, полученные по возмущениям хромосферных структур перед вспышками (как крупными, так и малыми). Первые возмущения – на масштабах расстояний до сотен тысяч км от будущей вспышки (полагаю, что здесь может быть какая-то связь с гигантскими ячейками конвекции) и вторые – на масштабах расстояний десятков тысяч км. Эти результаты также способствуют разработке новых методов краткосрочного прогноза. В двух последних разделах главы изложено подробное изучение двух активных областей, в которых происходили вспышки. Сравнение предвспышечных изменений физических параметров, таких, например, как рост градиента магнитного поля, приводит автора к выводу, что механизмы вспышек разной мощности принципиально не отличаются. Это лишний раз свидетельствует об актуальности проделанной работы о малых вспышках.

В пятой главе рассматриваются «внепятенные» вспышки в спокойных областях Солнца. Рассматривается их динамика, сопутствующие хромосферные структуры, изменения хромосферы до вспышки, магнитные поля. Глава большая по объему и содержанию. Вполне логичен результат автора, что перед вспышкой в невозмущенных областях происходит активизация хромосферных структур. Автор оценивает время активизации хромосферы перед вспышкой как 10-60 мин. Хотя рассматриваемые вспышки происходят вне пятен, в работе указывается, что им предшествует период эволюции активной области, сопровождающийся возмущением обширных полей тонкой структуры хромосферы. Это важный вывод. Что касается магнитных полей, автор обнаруживает, что вспышки малой мощности возникают вблизи локальных короткоживущих линий раздела полярности магнитного поля при всплытии новых магнитных потоков, что приводит к росту градиента поля, как и для крупных вспышек.

Оценивая диссертационную работу А.В. Боровика в целом, замечу, что проделана большая работа по получению фактических данных о вспышечных процессах на Солнце и их предикторах, **достоверность** и **обоснованность** сделанных автором выводов не вызывает сомнения. В диссертации получены **новые фундаментальные результаты**. Основное внимание уделено вспышкам малой мощности. Получено, что по ряду параметров они не уступают крупным вспышкам и механизмы вспышек разной мощности принципиально не отличаются. Акцент внимания сделан на хромосферных вспышках по наблюдениям в линии Н-альфа. Замечу здесь, что имеются теоретические соображения, что ускорение электронов во вспышке происходит именно в хромосфере, поскольку в короне плотность плазмы недостаточна для ускорения числа электронов, типичных для вспышки (Zaitsev V., Kronshtadnov P., and Stepanov A. // Solar Physics, 291, 2016). Это придает еще большую **актуальность** работе, сделанной автором.

Результаты, вынесенные на защиту, можно принять. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что работа «СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ЛИНИИ Н α » удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по

специальности 1.3.1. – Физика космоса, астрономия, а ее автор Александр Васильевич Боровик заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Наговицын Юрий Анатольевич,

доктор физико-математических наук,

диссертация защищена по специальности

01.03.03 – Физика Солнца.

Заместитель директора по научной работе,

Федеральное государственное

бюджетное учреждение науки

Главная (Пулковская) астрономическая

обсерватория Российской академии наук

(ГАО РАН).

Адрес: 196140, Санкт-Петербург,

Пулковское шоссе, 65, корп.1

телефон: +7 812 363 7258,

email: nag-yury@yandex.ru

18.09.2024



Ю.А. Наговицын