

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Александры Львовны Лысенко

### **«ИМПУЛЬСНОЕ УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И ИХ РОЛЬ В НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ»,**

представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.03 «Физика Солнца»

Диссертационная работа А.Л.Лысенко посвящена в первую очередь исследованиям свойств так называемых «холодных» солнечных вспышек (т.е., вспышек с низким тепловым откликом относительно нетеплового излучения) в рентгеновском и микроволновом диапазонах и определении их отличий от обычных вспышек по морфологии и характеристикам ускоренных частиц. Второй задачей было определение характеристик электронов и ионов, ускоренных в мощных солнечных вспышках X-класса, сопровождающихся гамма-излучением. Данные задачи непосредственно связаны с вопросом о соотношении долей свободной магнитной энергии, идущих на ускорение частиц и на прямой нагрев плазмы во время вспышки, а также с такими фундаментальными вопросами физики солнечных вспышек, как механизм первичного энерговыделения и механизмы ускорения электронов и ионов.

Обе научные задачи решались на основе привлечения новых для физики Солнца данных наблюдений, полученных в ходе российского эксперимента по исследованию космических гамма-всплесков Konus-Wind. Именно это во многом определило актуальность и новизну диссертационной работы. Наблюдения на приборе Konus-Wind проводятся с 1994 г. по настоящее время и предоставляют уникальный массив данных наблюдений солнечных вспышек в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах (более 1000 вспышек в триггерном режиме в диапазоне 20 кэВ – 15 МэВ с временным разрешением до 2 мс). Активное использование этого массива для исследований по физике Солнца началось относительно недавно и во многом является заслугой диссертанта. Особо следует отметить организованный автором свободный доступ к созданной базе данных Konus-Wind через глобальную сеть Интернет. Это, безусловно, принципиально правильное решение. Международный опыт (NoRH, RHESSI, SDO, и другие обсерватории) убедительно свидетельствует о высокой научной эффективности политики открытых данных. Количество публикаций и полученных результатов с использованием такой политики возрастает во много раз.

В своём отзыве я сосредоточусь, в основном, на близких мне по тематике результатах, относящихся к микроволновому и жесткому рентгеновскому (ЖР) излучению вспышек. До начала работы над диссертацией было известно лишь об единичных случаях наблюдений вспышек с низким тепловым откликом относительно нетеплового излучения в жестком рентгеновском и микроволновом излучении. Благодаря длительному периоду наблюдений Konus-Wind (более двух полных циклов солнечной активности), Александре Лысенко удалось на основе четких критериев отобрать статистически значимые выборки событий (42 «холодных» вспышки и, для сравнения, 405 обычных вспышек) для аккуратного статистического анализа общих свойств и отличительных особенностей вспышек с низким тепловым откликом. Особо отмечу здесь два выявленных статистически значимых отличительных признака «холодных» вспышек. Диссертантом было показано, что «холодные» вспышки характеризуются: 1) меньшими длительностями в ЖР и микроволновом диапазонах: медианные значения распределения составляет всего 8 с

против 48 с для опорных вспышек; 2) более жесткими (более пологими) энергетическими и частотными спектрами, соответственно. Автор предлагает вероятную причину отличия по длительности «холодных» и «обычных» вспышек: «холодные» вспышки происходят в более компактных и однородных по магнитному полю вспышечных петлях. Эта причина вполне согласуется с наблюдательным фактом, что многие «холодные» вспышки характеризуются высокими пиковыми частотами гиротронного спектра в микроволновом диапазоне и, соответственно, ассоциируются с компактными петлями с высоким магнитным полем. Вместе с тем, в диссертации отмечается, что из этой интерпретации явно выпадают некоторые «холодные» вспышки, отличающиеся, наоборот, низкими пиковыми частотами, которые должны ассоциироваться с протяжёнными разреженными петлями со слабым магнитным полем. В диссертации, подробно исследуется одна из таких «холодных» вспышек (2002-03-10), характеризующаяся, наряду с низкой пиковой частотой микроволнового спектра, ещё и значительной задержкой теплового рентгеновского излучения относительно нетеплового. На основе моделирования коронального магнитного поля и оригинального анализа всех доступных данных, включая УФ и микроволновые данные с пространственным разрешением, удалось показать, что энергичные электроны, захваченные в магнитную ловушку в протяжённой вспышечной петле, породили задержанное низкочастотное излучение в микроволнах и задержанный по времени нагрев плазмы. При этом весь наблюдаемый в мягком рентгене нагрев обеспечен исключительно энергией, запасённой в ускоренных электронах, без привлечения других механизмов нагрева.

Характер решения поставленных задач определил структуру диссертации, которая состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

**Введение** содержит обсуждение актуальности проведенных исследований, формулировки цели и задач, перечислены положения, выносимые на защиту, отмечается новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведено краткое содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена описанию инструментов и методов, использованных в работе. Особое внимание уделено разработанному в ФТИ им. А. Ф. Иоффе инструменту Konus, размещённому на американском космическом аппарате Wind. Описаны применяемые в работе статистические методы анализа данных и теоретические методы трёхмерного моделирования (методы восстановления магнитного поля в короне по фотосферным значениям и методы моделирования характеристик микроволнового и рентгеновского излучений).

**Вторая глава** посвящена статистическому анализу солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте Konus-Wind в триггерном режиме. Показано, что эти распределения в целом согласуются с предыдущими исследованиями для периода 2002-2010 гг, основанными на данных RHESSI. Далее в диссертации этот установленный факт позволил использовать вспышки, зарегистрированные Konus-Wind в триггерном режиме, в качестве опорного набора вспышек для других исследований.

**Третья глава** содержит изложение результатов статистического анализа набора «холодных» вспышек с непропорционально слабым тепловым излучением, относительно нетеплового. Показано, что эти вспышки статистически значимо отличаются по своим свойствам от средних (опорных) вспышек.

В Четвертой главе проведен подробный анализ конкретной «холодной» вспышки с относительно слабым потоком мягкого рентгеновского излучения. Анализ сопровождался трехмерным моделированием микроволнового и рентгеновского источников.

В Пятой главе излагаются исследования солнечных вспышек, зарегистрированных Konus-Wind в гамма-диапазоне. Благодаря наблюдениям гамма-излучения в триггерном режиме в диапазоне с временным разрешением до 2 мс диссертанту удалось провести детальный анализ быстрой, на масштабе времени  $\sim 30$  с, спектральной эволюции ускоренных протонов в мощной солнечной вспышке класса X9.3 6 сентября 2017 г.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использовать в текущих и будущих исследованиях: а) созданную автором базу данных рентгеновского и гамма излучения солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте Konus-Wind; б) результаты, полученные при изучении «холодных» вспышек, важных для понимания распределения энергии между компонентами вспышки; в) установленные особенности быстрой эволюции спектра излучения вспышек в гамма-диапазоне для верификации механизмов ускорения ионов в солнечных вспышках. Думаю, что результаты диссертационной работы будут востребованы в ГАО РАН, НИРФИ ННГУ, ФТИ РАН, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, МИФИ РАН, ИПФ РАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН и других организациях, в которых проводятся исследования по данной тематике.

#### **Заключительные замечания:**

Диссертационная работа оставила у меня ощущение актуального и добротного исследования, её структура логична, оформление текста и рисунков производит хорошее впечатление. Читать диссертацию было интересно и познавательно. Следует отметить большую осведомлённость автора в современных методах многоволновых исследований Солнца, в методах статистического анализа. Проводимый анализ данных достаточно детален и методически выверен, выводы хорошо обоснованы. Вместе с тем есть некоторые критические замечания и пожелания на будущее.

1. Формулировки основных положений выносимых на защиту (например, пп. 4 и 5) по стилю не согласуются с предыдущими (с пп.1, 2, 3).
2. Некоторые формулировки также выглядят странными (жаргон). Например: «...в обоих случаях спектральные индексы холодных вспышек оказываются жёстче»; «... для холодных вспышек характерны более пологие индексы в области высоких частот и, напротив, более крутые индексы в области низких частот ...»; «... указывает на оптически тонкое излучение на этих промежуточных частотах,...».
3. При обсуждении «холодной» вспышки с аномально низким и задержанным во времени тепловым откликом (гл.4) предполагается, что в малую и большую петли инжектируется примерно одинаковое количество ускоренных электронов. Затем проводится моделирование и анализ излучений только из большой петли. Для сравнения с наблюдениями следовало бы провести также моделирование и вклад в общий поток излучения из компактной петли, поскольку ЖР и микроволновые наблюдения не имеют достаточного пространственного разрешения.
4. В диссертации (гл.3) получен интересный результат о более жёстком спектре излучений в «холодных» вспышках. Физическая природа этого эффекта обсуждена лишь на качественном уровне. Численное моделирование этого эффекта представляется очень перспективным.

Безусловно, перечисленные недочеты не являются принципиальными при оценке основных результатов соискателя.

Профессионализм и личный вклад А.Л.Лысенко известен специалистам, работающим в области физики солнечных вспышек. Результаты диссертации прошли тщательную научную экспертизу. Они докладывались автором на многих российских и международных конференциях, опубликованы в научных журналах, рекомендуемых ВАК.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По моему мнению, диссертационная работа Александры Львовны Лысенко является завершённой научной работой и содержит важные новые результаты. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор несомненно достоин ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН), доктор физико-математических наук, специальность 01.03.02 «астрофизика и звездная астрономия»

В.Ф. Мельников

Адрес: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 61,  
Телефон, e-mail: +7-903-058-3012, [v.melnikov@gaoran.ru](mailto:v.melnikov@gaoran.ru)

Подпись Мельникова В.Ф.

заверяю

Ученый секретарь ГАО  
РАН, к.ф.-м.н



15.10.2020

Т.П. Борисевич