«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИЗМИРАН

_____

д. ф.-м. н. В.Д. Кузнецов
« 9 » октября 2020 г.

Отзыв Ведущей организации
на диссертацию **Лысенко Александры Львовны**
«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

Солнечные вспышки возникают в результате взрывного выделения энергии, накопленной в эволюционирующей магнитосфере активных областей. Этот процесс, длящийся от секунд, до десятков минут и даже часов, связан с магнитным пересоединением и существенной перестройкой топологии магнитного поля в хромосфере и короне. Он сопровождается интенсивными всплесками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, который в отдельных случаях может простираться от гамма до длинноволнового радиоизлучения. Это свидетельствует как о нагреве солнечной плазмы, так и об ускорении большого количества электронов и ионов до нетепловых энергий, вплоть до релятивистских. Кроме того, солнечные вспышки могут сопровождаться выбросами в межпланетное пространство значительного количества замагниченной корональной плазмы – корональными выбросами массы (КВМ). Несмотря на значительный прогресс в наземных и спутниковых наблюдениях солнечных вспышек и в понимании их природы, многие аспекты вспышечного процесса требуют развития и уточнения. В частности, до сих пор не до конца ясно, где, когда и как именно ускоряются заряженные частицы, чем обусловлено перераспределение энергии между такими проявлениями вспышек, как нагрев плазмы и ускорение частиц.

Диссертационная работа А.Л.Лысенко является заметным шагом вперёд в изучении этих проблем. Она посвящена исследованию ряда актуальных вопросов физики солнечных вспышек, в частности, изучению ускорения частиц и нагрева плазмы на малых временных масштабах начальной импульсной фазы вспышек. Такой выбор предмета исследования обусловлен тем, что диссертация основана на данных оригинальных наблюдений жёсткого рентгеновского и гамма-излучения, проводимых уже в течение 25 лет при помощи российского инструмента Konus, размещённого на американском космическом аппарате Wind, находящемся в точке либрации. В триггерном режиме Konus регистрирует временные профили жёсткого рентгеновского и гамма-излучения в трёх широких энергетических каналах в диапазоне энергии фотонов 20–1200 кэВ с очень высоким временным разрешением (до 2 мс) в течение первых 3,5 минут, одновременно с накоплением многоканальных спектров в диапазоне 20 кэВ–15 МэВ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 170 страниц, включая 47 рисунков, 11 таблиц и библиографии из 168 наименований.

Введение диссертационной работы представляет собой краткий обзор современного состояния и нерешённых вопросов физики солнечных вспышек, имеющих отношение к теме диссертации. Дана общая характеристика работы. Показана актуальность, новизна и значимость проведённых исследований. Сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту. Приведен список работ автора по теме диссертации. Охарактеризован личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию.

В **Главе 1** описаны основные инструменты и методы, использованные в работе. Приведено описание основного инструмента Konus-Wind и подчёркивается уникальность его данных. Комплексный и многосторонний характер исследований обеспечен тем, что, кроме измерений Konus, в работе использованы данные практически всех современных наземных и космических солнечных инструментов, работающих в других диапазонах. Это позволило включить в исследование частотные спектры микроволновых радиовсплесков, временные профили мягкого рентгеновского излучения, изображения источников жесткого рентгена, крайнего ультрафиолета и сантиметровых всплесков, а также магнитограммы соответствующих активных областей на уровне фотосферы. Представлены используемые разнообразные методы и процедуры анализа этих данных, моделирования временных профилей, спектров и других характеристик импульсных вспышечных излучений.

В **Главе 2** приведены результаты статистического исследования солнечных вспышек, наблюдавшихся инструментом Konus в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах в течение двух полных солнечных циклов. Одним из важных результатов диссертации является создание общедоступной базы данных, в которой представлены многоканальные спектры и временные профили более чем 1000 вспышек, зарегистрированных в триггерном режиме. На основе этих данных определены параметры степенных статистических распределений пиковых потоков и длительностей рассматриваемых вспышек.

Глава 3 посвящена исследованию зарегистрированных на Konus вспышек с низким тепловым откликом в мягком рентгене на ранней импульсной фазе – так называемых холодных вспышек. Анализ таких холодных вспышек в жестком рентгеновском и микроволновом диапазонах показал, что они статистически значимо отличаются по своим свойствам от обычных опорных вспышек. В частности, они характеризуются более жёсткими фотонными спектрами, более жёсткими спектрами ускоренных электронов, а также меньшими фотонными потоками и потоками ускоренных электронов по сравнению со вспышками опорной группы. Выделены две группы холодных вспышек: одна соответствует компактным корональным петлям с сильным магнитным полем и демонстрирует высокие пиковые частоты гиросинхротронного спектра в микроволновом диапазоне, вторая ассоциируется с протяжёнными высокими петлями и обнаруживает низкие пиковые частоты сантиметровых всплесков.

В **Главе 4** представлены детальный анализ и физическая модель наблюдавшейся на Konus в жёстком рентгеновском диапазоне холодной вспышки 10 марта 2002 г. с задержкой нагрева. Особенностями данной вспышки были: аномально низкий и задержанный во времени тепловой отклик в мягком рентгене, задержка микроволновых временных профилей на низких частотах относительно временных профилей на высоких частотах, переменная поляризация микроволнового излучения. Эти характеристики интерпретируются в рамках модели, включающей магнитное пересоединение при взаимодействии большой и малой петель и примерно равное распределение ускоренных электронов между двумя этими петлями. Электроны в малой петле с сильным магнитным полем ответственны за импульсное излучение вспышки в жёстком рентгеновском и

микроволновом диапазонах на высоких частотах, а электроны, захваченные в ловушку большой разреженной петли, породили плавное, задержанное на более низких частотах сантиметровое излучение и задержанный по времени нагрев. При этом для наблюдаемого в мягком рентгене нагрева плазмы достаточно только энергии, запасённой в ускоренных электронах, без привлечения других механизмов нагрева.

В Главе 5 анализируются зарегистрированные инструментом Konus солнечные гамма-вспышки, связанные с ускорением ионов. При изучении импульсной фазы самой интенсивной вспышки 24-ого цикла балла X9.3, произошедшей 6 сентября 2017 г., измерена динамика основных компонент гамма-излучения на масштабе десятков секунд, оценены соответствующая эволюция параметров ускоренных протонов, нижний предел величины ускоряющего электрического поля и размер области ускорения. Обнаружена высокая корреляция между изменением индекса степенного спектра ускоренных протонов и степенного индекса низкоэнергичного континуума (<300 кэВ), порождённого тормозным излучением ускоренных электронов нерелятивистских и среднерелятивистских энергий, а также антикорреляция со спектральной эволюцией континуума на больших энергиях. Зафиксирована задержка высокоэнергичной части континуума относительно низкоэнергичной, которая составила18 с.

В спектре другой вспышки балла X2.4 9 июля 1996 г., после которой впервые наблюдалось солнцетрясение, зафиксированы гамма-линии, но, в отличие от вспышки 6 сентября 2017 г., не было ужестчения спектра континуума на высоких энергиях, а также быстрой эволюции в течение импульсной фазы спектра протонов и степенного индекса континуума.

Особенностью третьей рассмотренной в этой главе вспышки балла X1.1 6 июля 2012 г. было отсутствие в гамма-спектре импульсной фазы линии захвата нейтронов 2.223 МэВ, несмотря на то, что в межпланетном пространстве нейтроны и протоны от этой вспышки были зарегистрированы инструментом PAMELA. По мнению диссертанта это может быть обусловлено высокой пучковой анизотропией рождённых нейтронов в направлении от поверхности Солнца.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Замечания к содержанию диссертации:

1. При обсуждении результатов анализа холодных вспышек следует учитывать влияние магнитогидродинамической и волновой турбулентности на ускорение и динамику энергичных частиц во вспышечных ловушках.
2. Нет смысла сопоставлять гамма-излучение, регистрируемое на ранней импульсной фазе вспышек инструментом Konus, с протонами и нейтронами, которые были измерены в околоземном космосе, в частности, в эксперименте PAMELA (раздел 5.4). В эруптивных вспышках, помимо импульсной фазы, существенный и даже основной вклад в солнечные космические лучи вносят два других источника длительного ускорения частиц, связанных с корональными выбросами массы (КВМ): (а) пост-эруптивное энерговыделение при релаксации возмущённого КВМ магнитного поля в короне через пересоединение к новому равновесному состоянию в сочетании с коллапсирующими пост-эруптивными петлями-ловушками; (б) ускорение электронов и ионов во фронте ударной волны перед быстро движущимся КВМ.
3. Диссертация не даёт преставление о том, насколько исследуемая ранняя холодная фаза вписывается в общий сценарий вспышек. Предметом дальнейшего анализа измерений на Konus в комплексе с данными других современных инструментов могут стать вопросы, связанные с наличием или отсутствием холодной фазы в начале как кратковременных низких компактных вспышек, сопровождаемых коллимированными джетами, так и продолжительных эруптивных вспышек, в которых важную роль играют КВМ.

Среди **замечаний технического характера** отметим следующие:

1. Во всём тексте во многих местах оставлены интервалы для тире (или двоеточий), но они почему-то не проставлены. Это затрудняет чтение.
2. В нескольких местах текста (стр. 17, 86, 132, 149) применительно к магнитному полю вместо общепринятого термина «сильное» используется не совсем подходящее определение «высокое».
3. Несмотря на то, что прибор Konus работал с 1994 г., специалистам по физике Солнца он стал известен (в том числе, благодаря работам А.Л.Лысенко) только в последние годы. В диссертации эксперимент Konus многократно упоминается во Введении, начиная со стр. 13, а первую ссылку [56] на его описание (к которой следовало бы сразу добавить ссылку [104]) читатель может найти только на стр. 21.
4. В конце ссылок на статьи, опубликованные в ряде иностранных журналов последних лет, используется сочетание «P.», т.е. ошибочно имеется в виду номер страницы, хотя на самом деле последующие цифры обозначают «id.» (порядковый номер статьи в томе или выпуске журнала). Примеры: [16,19, 36, 40, 47,48 52–55, 80, 83, 92] и др.
5. В немногочисленных ссылках на статьи, опубликованные в отечественных журналах, приводятся только данные переводных англоязычных публикаций, а данные русскоязычных публикаций не указаны. Примеры: [23, 29, 58, 62, 104]. Это касается и употребляемых в диссертации англоязычных названий и аббревиатур четырёх российских обсерваторий и инструментов (см. стр. 24, 25).

Указанные замечания не снижают очевидных достоинств диссертации А.Л.Лысенко и не влияют на её содержание и положительную оценку. В целом данная работа, основанная на самых современных космических и наземных наблюдениях и передовых методах анализа и интерпретации полученных данных, является значимым научным исследованием в области физики солнечных вспышек.

Положения, выносимые на защиту, достоверны и обоснованы. Результаты диссертационного исследования опубликованы в престижных российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных системах цитирования, а также представлены на крупных российских и международных конференциях. Автореферат диссертации адекватно отражает её содержание.

Рассматриваемая диссертационная работа вполне отвечает требованиям, предъявляемой ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор – А.Л.Лысенко – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

Результаты работы А.Л.Лысенко могут быть использованы в ИНАСАН, ИКИ, ФИАН, ГАИШ, НИИЯФ, ИЗМИРАН, ФТИ, ГАО, ИПФ, ИСЗФ, КрАО, САО и других российских и зарубежных научных организациях.

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником отдела солнечно-земной физики ИЗМИРАН, канд. физ.-мат. наук И.М.Чертоком, обсуждён и одобрен на секции Учёного совета ИЗМИРАН по солнечно-земной физике 5 октября 2020 г.

к.ф.-м.н. И.М.Черток

108840, Москва, г.о.Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН, тел. (495)-851-09-26,
e-mail: ichertok@izmiran.ru