

“УТВЕРЖДАЮ”



Директор ИЗМИРАН
доктор физ.-мат. наук
Кузнецов В.Д.

12 февраля 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) на диссертацию

Киселёва Валентина Игоревича

«Свойства солнечных событий — источников околоземных протонных возрастаний», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — физика Солнца.

Работа посвящена фундаментальным вопросам сценария и физики солнечных эруптивных вспышек и корональных выбросов массы (КВМ), ответственных за крупные возрастания приходящих к Земле потоков солнечных космических лучей (СКЛ), а также методам диагностики солнечных протонных событий (СПС) по характеристикам связанным с ними высокочастотных радиовсплесков.

Актуальность данного исследования очевидна, поскольку многие аспекты свойств и физики указанных выше явлений всё ещё остаются не до конца выясненными. Кроме того, понимание природы и механизмов происхождения эруптивных вспышек, КВМ и СПС важны для практической диагностики и прогнозирования спорадических возмущений космической погоды. В частности, СКЛ, как известно, могут вызывать сбои в работе электронного оборудования космических аппаратов, приводить к повышению уровня радиации на межпланетных и околоземных орбитах, представлять опасность для космонавтов, а также экипажей и пассажиров самолетов, летающих по приполярным трассам, приводить к нарушениям коротковолновой радиосвязи в высоких широтах и т.д.

В работе В.И. Киселёва на основе использования самых современных и во многом оригинальных методов обработки и анализа различных наземных и спутниковых наблюдательных данных с помощью интерактивного языка Interactive Data Language (IDL) решались следующие задачи:

1. Развитие методик измерения кинематики эруптивных структур, распространения волновых возмущений и параметров микроволновых всплесков и протонных возрастаний.

2. Выяснение характера возбуждения в мощных эруптивных вспышках ударных волн и их свойств.

3. Выяснение особенностей мощных вспышек и их микроволнового излучения.

4. Сравнение микроволновых наблюдений вспышек с их проявлениями в других диапазонах.

5. Статистический анализ соотношений между параметрами солнечных эрупций и протонных возрастаний.

Результаты решения этих задач составляют основное содержание диссертации, которая состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 197 источников. Объём диссертационной работы довольно большой и составляет 183 страницы, включая 64 рисунка и 5 таблиц.

Во **Введении** представлена общая характеристика работы: обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения; приведены сведения об апробации работы и её краткое содержание.

Первая глава посвящена методам измерений кинематики эруптирующих структур и волновых возмущений на получаемых в настоящее время и используемых в диссертации высококачественных изображениях в рентгеновском (телескопы Hinode/XRT, GOES-12/SXI), оптическом (магнитографы Hinode/SOT, SOHO/MDI, коронографы SOHO/LASCO, STEREO/SECCHI COR1-2), крайнем ультрафиолетовом (телескопы SOHO/EIT, SDO/AIA, STEREO/SECCHI EUVI) и радио- (радиогелиограф Нобейма, NoRH) диапазонах. Показано, что предложенный метод аппроксимации эрупционных и волновых траекторий аналитической функцией позволяет получить более точные временные профили скорости и ускорения, соответствующие стабильному поведению наблюдаемой структуры. При этом исключаются артефакты, нередко возникающие при использовании традиционных методов, основанных на прямом дифференцировании экспериментальных отсчётов.

Во **второй главе** на основе данных космических обсерваторий RHESSI, Hinode, GOES, магнитографа SOHO/MDI, радиогелиографа NoRH и радиополяриметров Нобейма, радиоспектрографов обсерваторий Кулгура, Лермонт, Каллисто выполнен анализ солнечного эруптивного события 13 декабря 2006 г, вызвавшего 70-ое наземное возрастание потока космических лучей (GLE70). Представлены измерения кинематики трёх эруптировавших структур. Установлено, что импульсы их ускорения опережали микроволновые всплески примерно на 2 мин. Показано, что эрупции возбудили две ударные волны с интервалом в 4 мин. На изображениях крайнего ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов прослежено их распространение по всей видимой солнечной полусфере. В работе удалось согласовать дрейф всплесков II типа с распространением ударных волн. Также была обнаружена ударная волна, образовавшаяся при слиянии двух ударных волн, и проявлявшаяся как внешнее гало KBM, а также по

отклонению стримеров. Установлена связь максимальной мощности энерговыделения вспышки с её развитием в сильнейших магнитных полях над тенью крупных пятен.

В третьей главе изложены результаты анализа СПС 26 декабря 2001 г., вызвавшего GLE63. Вспышка, состоявшая из двух частей, изучена по данным телескопа TRACE в ультрафиолетовом канале 1600 Å, радиогелиографа Нобеяма (NoRH) на частоте 17 ГГц и Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) на частоте 5,7 ГГц. Установлено подобие движений микроволновых источников и вспышечных лент, видимых в канале 1600 Å, что указывает на расположение неразрешённых микроволновых источников в основаниях многих петель вспышечной аркады. Этот вывод подтверждён моделированием изображений как результат свёртки УФ изображений с диаграммой направленности NoRH.

Для дальнейшего исследования свойств вспышки разработана модель гиросинхротронного излучения распределённой системы однородных источников с разными площадями, расположенных в магнитных полях, соответствующих реальной магнитограмме. Полученные при моделировании радиоспектры соответствуют наблюдавшимся спектрам с точностью 30%. Установлено влияние асимметрии магнитной конфигурации, приводящей к 4-кратному изменению высокочастотной части спектра при тех же параметрах ускоренных электронов. Исследованы эволюция и свойства ударных волн и прослежены их проявления на изображениях коронографов SOHO/LASCO и на динамических спектрах радиовсплесков до 150 кГц. В этом событии на предмаксимальной стадии развития вспышки также обнаружено возбуждение двух ударных волн импульсно-поршневым механизмом. Впоследствии они слились вокруг радиального направления в одну более сильную ударную волну. Показано наличие вклада ускорения протонов и во вспышке, и на ударной волне.

Проанализированы характеристики околоземного протонного возрастания GLE63. Выявлены причины высокой протонной продуктивности события 26 декабря 2001 г.: повторные эрупции, способствовавшие как выходу ускоренных во вспышке частиц, так и подъёму KBM и формированию более сильной ударной волны, способной ускорить протоны.

В четвёртой главе приведён обзор ряда солнечных эруптивных событий, сопровождавшихся ударными волнами и СПС. Получены и обобщены результаты исследований ударных волн в 11 событиях разной мощности (рентгеновские вспышки балла от В до Х). Все ударные волны были импульсно возбуждены на фазе роста вспышки и вначале походили на взрывные. Затем ударная волна становилась головной, если KBM был быстрым; иначе она затухала. В 4-х событиях отмечено возникновение двойных ударных волн, что невозможно при изначальном возникновении головной ударной волны. Одинаковый импульсно-поршневый характер возбуждения ударных волн эрупциями на фазе роста вспышечного излучения согласуется с выводами предыдущих глав.

Показано, что для ряда событий, породивших мощные СПС и имеющих частоту спектрального максимума микроволновых всплесков более 20 ГГц, типичным является

внедрение вспыхивающих лент в сильнейшие магнитные поля над тенями пятен. Предложен сценарий выхода ускоренных в солнечных эруптивных событиях протонов в межпланетное пространство при пересоединении эруптировавших магнитных жгутов с открытыми корональными силовыми линиями стримеров или корональных дыр. Задержка относительно вспышки момента выхода в межпланетную среду тяжёлых частиц объяснена их переносом в магнитном жгуте до его пересоединения с открытыми структурами.

В пятой главе проанализированы соотношения между солнечными микроволновыми всплесками и околоземными протонными возрастаниями. Отличительной особенностью анализа является рассмотрение достаточно большого числа всплесков, зарегистрированных радиополяриметром Нобеяма на высокой частоте 35 ГГц, в комбинации с СПС в высокоэнергичном канале > 100 МэВ, наблюдавшимися на спутниках GOES. Анализ проведён с целью выяснения роли ускорения во вспышках и на корональных ударных волнах в происхождении солнечных протонных событий (СПС), а также определения диагностических возможностей высокочастотных радиовсплесков. В отличие от предшествующих работ, в которых рассматривалось соотношение между интенсивностями радиовсплесков и СПС, в данном случае исследована связь между их флюенсами.

Установлено, что корреляция между флюенсами радиовсплесков и СПС заметно превышает корреляцию между их пиковыми потоками. Этот факт, вероятно, отражает зависимость количества солнечных энергичных частиц от длительности процесса их ускорения. В событиях, связанных с интенсивными вспышками, коэффициент корреляции протонных флюенсов с флюенсами радио- и мягких рентгеновских всплесков выше, чем со скоростью КВМ. Этот результат указывает на то, что ускорение во вспышках вносит большой статистический вклад в высокоэнергичные СПС. Для потоков протонов высоких энергий ускорение на ударных волнах, связанных с мощными вспышками, менее существенно, но является важным и, возможно, преобладающим в относительно слабых событиях. Показано, что вероятность СПС существенно зависит от пиковой плотности потока, длительности и флюенса радиовсплесков на частоте 35 ГГц. Представлены аргументы, свидетельствующие о том, что роль «Синдрома большой вспышки» сильно преувеличена в литературе. Сформулирован предварительный диагностический критерий и получены эмпирические соотношения, позволяющие производить заблаговременную диагностическую оценку параметров СПС по характеристикам радиовсплесков на частоте 35 ГГц.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Наиболее важные из этих результатов, определяют новизну и значимость работы и сводятся к следующему:

1. Выявлено возникновение двух ударных волн во время импульсной фазы вспышек в двух солнечных эруптивных событиях, вызвавших наземные возрастания интенсивности СКЛ. В одном из событий выявлено две эрупции, опережавшие

вспышечные эпизоды, и возбуждавшие импульсно-поршневым механизмом две ударные волны, распространявшиеся через всю видимую солнечную полусферу. Две ударные волны в обоих событиях были возбуждены тем же механизмом, слившись затем в одну более сильную волну. В одном из событий радиоизлучение ударной волны прослежено до километровых волн.

2. Установлены новые факторы, влияющие на протонную продуктивность солнечных эруптивных событий: а) ускорение протонов ударными волнами возможно уже на фазе роста вспышки; б) протонная продуктивность события может быть усилена повторной эрупцией; в) протоны, захваченные в эруптивный жгут, могут получить доступ в межпланетное пространство в результате магнитного пересоединения жгута с открытыми корональными структурами.

3. Установлено соответствие наблюдавшихся в двух мощных солнечных вспышках простых нетепловых микроволновых источников вспышечным аркадам. Причинами различий структур, наблюдаемых в тепловом и нетепловом излучении, являются как разная зависимость излучения от магнитного поля, так и различие инструментальных характеристик телескопов. Разработана модель гиротронного излучения многопетельной распределённой системы, позволившая воспроизвести наблюдавшиеся особенности микроволнового излучения вспышки и подтвердившая, что видимая однопетельная конфигурация в действительности соответствовала многопетельной аркаде.

4. Установлена связь вероятности солнечных протонных событий с максимумом потока, длительностью и флюенсом микроволнового всплеска, выявленная в результате статистического анализа соотношений между параметрами околоземных протонных возрастаний с энергиями выше 100 МэВ и микроволновыми всплесками на частоте 35 ГГц. Для событий с мощными всплесками выше 1000 с.е.п. установлена высокая корреляция (0,9) между микроволновыми и протонными флюенсами (проинтегрированными по времени потоками), присутствующая в диапазоне нескольких порядков величины.

Диссертация написана хорошим литературным языком, хорошо оформлена, содержит большое количество наглядного иллюстративного материала, хотя и не свободна от некоторого количества грамматических погрешностей и опечаток. Например, в формулировке Положения 1, выносимого на защиту, имеется следующее грамматическое несогласование: "Две ударные волны в обоих событиях были возбуждены тем же механизмом, слившись затем в одну более сильную волну"; на стр. 16: "...слились вокруг радиального направления..."; на стр. 20: "...в чувствительных к более холодной плазме каналах 94 и 171 Å..." – вероятно, 131 и 171 Å; на стр. 58: "61,4 км/с²" – вероятно, 61,4 м/с².

Замечания по работе:

-- В диссертации, в том числе в положении, выносимом на защиту, утверждается, что эруптивные явления возбуждают ударные волны импульсно-поршневым механизмом на ранней стадии развития вспышки, но, к сожалению, нигде не поясняется, изменения каких физических величин (скорости, давления) в результате каких процессов ответственны за появление ударных фронтов.

-- Квазипериодические колебания, присутствующие на рис. 1.6 и рис. 1.7, а также в явлении 13 декабря 2006 г., скорее всего, не являются артефактами. Они исключаются предлагаемой методикой вычисления кинематических характеристик, что, вероятно, оправданно целью данных исследований. Возможность квазипериодических пульсаций отмечается автором на стр. 46 с указанием на их возможную роль в инициации эрупций.

-- При рассмотрении вспышек как источников СПС следует иметь в виду, что ускорение электронов и протонов происходит не только в результате первичного (импульсного) энерговыделения в нижней короне, но и на постэруптивной (ПЭ) фазе вспышки, когда магнитное во всей магнитосфере над активной областью, сильно возмущённое КВМ, релаксирует к новому квазиравновесному состоянию посредством длительного магнитного пересоединения в протяженном вертикальном токовом слое. На этой фазе ускорение частиц может иметь место также в коллапсирующих ПЭ магнитных ловушках. При этом частотный спектр микроволновых всплесков смещается в сторону низких частот и слабо проявляется на такой высокой частоте, как 35 ГГц.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации В.И. Киселёва, которая выполнена на высоком научном уровне. Доклад В.И. Киселёва по материалам диссертации заслушан на семинаре ИЗМИРАН по солнечно-земной физике 25 января 2018 г. и получил положительную оценку. Выносимые на защиту положения, выводы и рекомендации являются новыми и научно обоснованными. Достоверность научных выводов и положений обеспечена использованием физически обоснованных методов и в части радиодиагностики СПС представительной статистикой наблюдений. Результаты диссертации докладывались на многих отечественных и международных конференциях.

Значимость результатов диссертации определяется выводом о раннем импульсно-поршневом возбуждении ударных волн, одинаковом для существенно различающихся событий, что смещает интервал ускорения ионов на ударных волнах в сравнении с предполагаемым и изменяет интерпретацию времени выхода частиц в межпланетное пространство, основанную на традиционных гипотезах. Вывод о фактическом пространственном соответствии источников нетеплового радиоизлучения и теплового излучения других диапазонов при их видимом на разных инструментах различии важен для адекватного отождествления вспышечных конфигураций и понимания процессов ускорения частиц в солнечных вспышках. Развитые методики вычисления параметров

солнечных микроволновых всплесков позволят повысить точность оценок. Предложенные элементы расчётной схемы для моделирования гиротронного излучения многопетельной распределённой системы микроволновых источников могут стать основой для разработки полноценной модели микроволнового излучения реалистичной вспышечной конфигурации с учётом неоднородностей её параметров. Установленная зависимость вероятности околоземного протонного возрастания > 100 МэВ и его флюенса от параметров солнечного микроволнового всплеска на частоте 35 ГГц и предложенные эмпирические соотношения пригодны для диагностики таких возрастаний. Эти соотношения можно будет использовать для оперативного прогноза вероятности протонных возрастаний, когда калиброванные круглосуточные микроволновые измерения будут доступны в реальном времени. Установленный характерный признак протонно-продуктивного события – перекрытие вспышечных лент с тенями пятен после проработки можно будет также использовать для оперативной диагностики протонных возрастаний.

Результаты диссертации рекомендуется использовать в ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ГАО РАН, ИПГ, ГАИШ и НИИЯФ МГУ и во многих других отечественных и зарубежных организациях, связанных с физикой Солнца и прогнозированием возмущений космической погоды.

Основные результаты и выводы, приведённые в диссертации, изложены в научных публикациях, включая 5 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

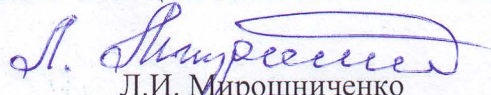
Диссертация соответствует специальности 01.03.03 – физика Солнца.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

ВЫВОД. Диссертация В. И. Киселёва по объёму и содержанию проведённых исследований вполне удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям: она является законченной научной работой, содержащей решение задач, имеющих значение как для фундаментальной солнечно-земной физики, так и для кратковременного прогнозирования спорадических околоземных протонных возрастаний. Следовательно, Валентин Игоревич Киселёв заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

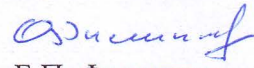
Отзыв подготовили:

Главный научный сотрудник отдела физики Солнца и солнечно-земных связей
ИЗМИРАН, доктор физ.-мат. наук


Л.И. Мирошниченко

Телефон: 8-495-851-02-82, e-mail: leonty@izmiran.ru

Главный научный сотрудник отдела физики Солнца и солнечно-земных связей
ИЗМИРАН, доктор физ.-мат. наук


Б.П. Филиппов

Телефон: 8-495-851-97-32, e-mail: bfilip@izmiran.ru

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании Секции учёного совета ИЗМИРАН по солнечно-земной физике (протокол №1 от 19 февраля 2018 г.).

Председатель Секции, руководитель направления по солнечно-земной физике,
доктор физ.-мат. наук



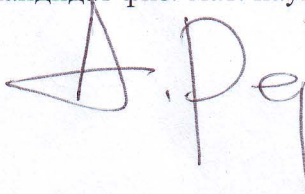
В.В. Фомичёв

Телефон: 8-495-851-01-23, e-mail: fomichev@izmiran.ru

Адрес: 108840, г. Москва, г.о. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН.

Подписи Л.И. Мирошниченко, Б.П. Филиппова, В.В. Фомичева заверяю.

Учёный секретарь ИЗМИРАН, кандидат физ.-мат. наук



А.И. Рез

«26» февраля 2018 г.

