

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу
Киселева Валентина Игоревича «Свойства солнечных событий – источников околоземных протонных возрастаний», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «Физика Солнца».

Диссертация В.И. Киселева – это комплексное исследование различных явлений солнечной активности, объединенных своей причастностью к мощным околоземным протонным возрастаниям солнечного происхождения (СПС). Поток СПС, достигая высоких значений, может оказывать существенное негативное воздействие на околоземное космическое пространство, космические аппараты и их экипажи.

Наблюдения солнечных космических лучей (СКЛ) на уровне Земли ведутся более 70 лет. Крайнее проявление СПС – так называемые наземные возрастания (GLE), т.е. потоки вторичных нейтронов, образуемых в земной атмосфере под воздействием наиболее жестких и мощных потоков протонов. GLE представляют регистрируемый приборами на земле отклик на высокоэнергичные протонные события.

Наблюдаются наземные возрастания сравнительно редко (менее 5% протонных событий), и накопленной статистики недостаточно для получения однозначных выводов о механизмах их генерации. Поэтому исследование таких событий остается **актуальным**, и главной их задачей является изучение связей между солнечными событиями и наземными протонными возрастаниями.

Диссертация В.И. Киселева «Свойства солнечных событий – источников околоземных протонных возрастаний» является **актуальной** работой, поскольку имеет значение для решения глобальных проблем и в физике Солнца, и околоземного космического пространства. Одна из них – физические свойства СПС и их связь с солнечными источниками. Самые большие потоки протонов появляются в межпланетном пространстве вблизи Земли после мощных вспышек на Солнце, и соответственно, наиболее радиационно-опасными являются периоды вблизи максимума цикла солнечной активности. Однако и на фазе спада солнечного цикла в 2005–2006 гг. наблюдались мощные вспышечные события. И тем важнее понять, какие факторы формируют энергетическое распределение потоков частиц вблизи Земли.

Актуальность темы диссертации для такого раздела физики Солнца, как происхождение солнечных частиц высоких энергий и их ускорение, не вызывает сомнений. Величина потока протонов вблизи Земли определяется развитием во времени всех этапов эруптивного события. Такими этапами могут быть: прямое ускорение частиц во время энерговыделения вспышки, затем – ускорение на фронте ударной волны в короне Солнца и ускорение в межпланетной среде. Вклад каждого из них в потоки частиц высоких энергий до сих пор неясен. Исторически сложились два конкурирующих взгляда на процессы ускорения частиц наиболее высоких энергий – во вспышке и на фронте ударной волны. До настоящего времени не удаётся выяснить, какой из них преобладает. Это дает основание утверждать, что научная проблема, сформулированная в диссертации, является **актуальной**. Решение указанной проблемы открывает возможности ответа на ряд вопросов об источниках СПС и связи между ними.

Целью диссертации были выявление из наблюдений сценариев эруптивных вспышек на Солнце, вызывающих мощные СПС, особенностей этих солнечных событий, и развитие подходов к оценке ожидаемой величины вызываемых ими СПС. Для достижения цели избран путь, включающий этапы детального анализа избранных событий по наиболее полным данным их разнообразных наблюдений, проверки выводов на ряде других событий и статистического анализа возможных связей между параметрами СПС и породив-

ших их солнечных событий. Соответственно сформулированы решаемые задачи, определившие общую структуру диссертации.

Во Введении дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность выбранной темы; сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту; представлены данные об апробации работы, объёме диссертации, изложено краткое содержание.

В **Главе 1** рассмотрены методы измерений, требуемые для решения поставленных задач. На основе сравнительного анализа известных подходов обоснован выбор аппроксимации кинематических измерений аналитическими функциями, приведены требуемые количественные соотношения. Представлены методы измерения параметров микроволновых всплесков и СПС.

В **Главе 2** детально анализируется экстремальное солнечное событие 13 декабря 2006 г., связанное с эруптивной вспышкой и корональным выбросом и вызвавшее наземное возрастание GLE69. Установлено, что экстремальные свойства события определялись вовлечённостью очень сильных магнитных полей над тенями пятен. Показано соответствие простой конфигурации, наблюдавшейся в нетепловом излучении радиогелиографом Нобейма, верхней части вспышечной аркады. Выявлены три эруптивных эпизода, измерена кинематика эруптивных структур – вероятно, магнитных жгутов, установлено опережение ими вспышечного излучения. На количественном уровне показано, что две наиболее мощных эрупции с интервалом в несколько минут возбудили две ударные волны, следы которых прослежены по всей видимой поверхности Солнца, в радиоизлучении метрового диапазона и на изображениях внешней короны. Впоследствии две волны слились в одну более сильную ударную волну.

В **Главе 3** подробно исследуется другое мощное событие, также вызвавшее наземное возрастание (GLE63) – 26 декабря 2001 г. При наличии обширной информации об этом СПС и GLE их солнечный источник ранее было мало изучен из-за недостаточности наблюдений. В результате анализа обширного набора не привлекавшихся ранее данных, в том числе косвенных, восстановлены общая картина и характеристики этого события. В первой части главы представлены обзор данных об СПС и GLE и их обсуждение с выводами об их возможном происхождении. Затем детально проанализирована вспышка по данным микроволнового и ультрафиолетового диапазонов. Проведён сравнительный анализ наблюдений теплового и нетеплового излучения, приведший к выводу о соответствии ответственных за них пространственных структур при их видимом различии. Для проверки этого вывода представлена вновь разработанная модель гиротронного излучения многоэлементной системы. Наконец, выявлены и проанализированы три вероятных эруптивных эпизода в этом событии, два из которых возбудили ударные волны, слившиеся затем в одну, более сильную. Проявления последней в радиоизлучении прослежены и количественно согласованы от метрового до километрового диапазона. Выявлены вероятные причины высокой протонной продуктивности события, обусловленные повторными эрупциями.

Глава 4 посвящена проверке общности выводов, полученных в Главах 2 и 3 в результате детального анализа двух мощных событий. С этой целью в трёх параграфах Главы 4 сделанные автором выводы сопоставляются с наблюдениями более широкого ряда событий, рассматривавшихся ранее другими исследователями. В параграфе 4.1 систематизированы результаты исследований ударных волн с выводом о типичности их импульсно-поршневого возбуждения в подтверждение общности выводов предыдущих глав. Параграф 4.2 демонстрирует типичность морфологического признака мощного протонного события – расположение вспышечных лент над тенями пятен, подтверждающее участие сильнейших магнитных полей в протонно-продуктивных событиях. В параграфе 4.3 проанализировано соотношение между временами выхода в межпланетное пространство протонов и электронов для большинства событий 23-го солнечного цикла, вызвавших с GLE, с выводом о типичности переноса ускоренных частиц магнитными жгутами.

В **Главе 5** представлен статистический анализ соотношений между параметрами СПС и микроволнового излучения вызвавших их эруптивных вспышек. Отправной точкой этого анализа стали выводы глав 2–4, показавших, между какими параметрами солнечной эруптивной активности и СПС следует ожидать связи. В результате статистического анализа установлены связь вероятности СПС с энергиями выше 100 МэВ с длительностью всплеска на 35 ГГц, его максимального потока и флюенса (площади под временным профилем всплеска). Выявлен факт высокой корреляции между флюенсами солнечных всплещных всплесков и флюенсами СПС. В числе выводов – преобладание всплещного вклада в СПС в событиях с мощными всплещками и обоснованность использования микроволновых наблюдений для оценки радиационного риска.

В **Заключении** в качестве **новых научных результатов** диссертантом представлены:

– Обнаружение возникновения двух ударных волн в каждом из исследованных мощных событий, вызвавших GLE, что не подтверждает распространённое предположение о начальном возбуждении ударной волны как головной и влечёт пересмотр оснований на нём выводов. Ударные волны в мощных событиях возбуждаются не внешними структурами корональных выбросов, а эруптивными протуберанцами внутри них.

– С первым результатом логически связаны установленные впервые факторы, влияющие на величину СПС: возможность раннего ускорения СПС ударными волнами в фазе роста всплещков, усиление СПС предшествующей эрупцией и задержанный выход ускоренных во всплещке частиц, переносимых эруптивным жгутом.

– Соответствие видимых в излучении ускоренных электронов простых структур всплещным аркадам, причины различия наблюдений теплового и нетеплового излучения – различия в зависимостях регистрируемого излучения от магнитного поля и в характеристиках используемых телескопов, и использованная при получении этого результата модель излучения аркады.

– Статистические соотношения, связывающие вероятность СПС с энергиями выше 100 МэВ с параметрами радиовсплеска на частоте 35 ГГц, и выявленная высокая корреляция между интегралами от их потоков.

В диссертации отдано предпочтение анализу комплексных данных наблюдений солнечных событий, а не опоре на нередко постулируемые, но не подтверждённые окончательно гипотезы. Этот трудоёмкий подход показал необходимость уточнения традиционных гипотез и привёл к новым результатам. В работе сделан следующий шаг в развитии предпосылок для практической оценки радиационного риска по микроволновым данным, существенный вклад в создание которых внесли отечественные исследователи в 1970-х – 1990-х гг.

Научная значимость диссертации определяется важностью понимания природы солнечных эруптивных событий и связанных с ними явлений, механизмов возникновения СПС в целом и для теории, которая достаточно полно объясняла бы процесс генерации и ускорения СПС.

Практическая значимость диссертации обусловлена в первую очередь тем, что в связи с освоением космического пространства и появлением национальных программ «Космическая погода», особенно значимым стал вопрос не только исследования, но и прогнозирования наземных возрастаний СКЛ. И прогностический результат, полученный Киселевым В.И., и методические разработки автора для обработки наблюдений, и составленный им каталог всплещных радиовсплесков на частоте 35 ГГц по данным обсерватории Нобейма и связанных с ними СПС получают практическое применение в дальнейших исследованиях.

Новизна исследований автора определяется тем, что в диссертации применен комплексный подход к исследованию солнечных эруптивных всплещков и вызванных ими СПС высоких энергий на основе анализа данных различных наблюдений на всех стадиях

развития событий. **Новизну** представляют результаты исследования редких событий, вызвавших наземные возрастания (GLE).

Степень **обоснованности и достоверности** научных положений и выводов, полученных в диссертации, определяется состоятельностью и непротиворечивостью физической картины, составляющими которой они являются, и количественным согласием с различными наблюдениями. Их **обоснованность и достоверность** подтверждена опубликованием содержащих их статей автора в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях и в обсуждении на российских и международных конференциях, на которых результаты получили одобрение ведущих специалистов. По теме диссертации имеется 9 публикаций, из них 5 статей в журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура диссертационной работы логично раскрывает тему исследования, и ее содержание достаточно полно отражено в автореферате. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка цитируемой литературы, содержащего 197 наименований. Общий объем диссертации 183 страницы, в том числе 64 рисунка и 5 таблиц.

Отмечу следующие замечания.

– В структуре главы 3 было бы целесообразным сгруппировать параграфы 3.2–3.12, относящиеся к вспышке, в один подраздел.

– Из 197 наименований списка литературы - лишь четыре позиции на русском языке.

– Нет полной ясности, почему для детального анализа были выбраны события 13 декабря 2006 г. и 26 декабря 2001.

– Статистический анализ соотношений между СПС и микроволновыми всплесками выполнен для событий, произошедших в течение светового дня в Нобееме. Неясны возможности использования полученных результатов для событий, произошедших в другое время суток в прошлом и для прогноза в будущем.

Отмеченные замечания не снижают в целом хороший научный уровень диссертационной работы, а результаты и полученные лично автором выводы дают основания для её положительной оценки. Автореферат полно отражает содержание диссертации, которая полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — физика Солнца.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей и космической
физики ФГБОУ ВО «ИГУ»

R Sotnikova

Сотникова Раиса Тимофеевна

Диссертация защищена по специальности
01.03.03 – «Физика Солнца»
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет»
Адрес: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1
Рабочий телефон – (3952) 242194
e-mail: RSotnikova@bk.ru

