

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Валентина Игоревича Киселёва  
**«СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ – ИСТОЧНИКОВ ОКОЛОЗЕМНЫХ  
ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ»**,

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

Диссертационная работа В.И. Киселёва посвящена комплексным исследованиям природы конкретных солнечных эруптивных вспышек, а также статистическим исследованиям источников околоземных возрастных потоков протонов СКЛ. Научная важность работы определяется необходимостью совершенствования нашего понимания механизма, места, времени и условий ускорения частиц высоких энергий. Особое внимание в ней уделено анализу двух конкурирующих концепций, относящих происхождение протонов высоких энергий ( $E > 100$  МэВ) к двум разным и далеко разнесенным в пространстве источникам. В первой концепции ускорение протонов ассоциируется с комплексом вспышечных процессов в магнитных полях нижней части короны. О характере этих процессов можно судить по наблюдаемым микроволновому, оптическому, УФ, рентгеновскому и гамма излучениям. Во второй концепции протоны и более тяжёлые ионы ускоряются головными ударными волнами, возбуждаемыми корональными выбросами массы (КВМ) высоко в короне, на высотах  $(1-2)R_s$ . Основными источниками информации здесь являются наблюдения всплесков II и IV типов метрового и декаметрового диапазонов, а также наблюдения КВМ на коронографах.

Актуальность проведенного исследования связана с появлением в последние годы совершенно новых типов наблюдений, связанных, прежде всего, с инструментами, имеющими высокое пространственное разрешение. На основе этих наблюдений в диссертации развита методика измерения кинематики эруптивных структур, которая позволила повысить точность и достоверность определения их скорости и ускорения, а также ключевых моментов времени, важных для сравнения динамики выбросов плазмы, ударных волн и электромагнитных излучений, характеризующих процесс ускорения электронов (микроволновое и жесткое рентгеновское излучения).

Развитые в диссертации методы анализа позволили получить ряд весьма оригинальных новых результатов, хорошо согласующихся с концепцией ускорения высокоэнергичных протонов СКЛ в ходе вспышечных процессов в нижней короне, в частности, в токовых слоях или на ударных волнах, возбужденных различными типами эрупций плазмы.

В этой связи в первую очередь хочется отметить обнаружение в одном из мощных протонных событий (13.12.2006) 2-минутного опережения временного профиля ускорения эруптивных структур и возникновения ударных волн относительно всплесков вспышечного излучения. Наличие этого опережения существенно для понимания эруптивных процессов и происхождения высокоэнергичных СКЛ. В частности, данный факт исключает возможность возбуждения этих ударных волн импульсом давления плазмы во вспышечных петлях, так как волны возникли раньше скачка давления в этих петлях. Другой принципиально важный результат заключается в доказательстве того, что возникшие с интервалом 4 мин во время

импульсной фазы вспышки две ударные волны распространялись через всю видимую солнечную полусферу. Это исключает возможность возбуждения обеих ударных волн внешней поверхностью КВМ. Более того, показано соответствие радиоизлучения II типа в диапазоне от метровых до километровых волн одной и той же ударной волне, возникшей на фазе роста вспышки.

Характер решения поставленных задач определил структуру диссертации, в которой отражен значительный вклад автора в развитие методов измерений кинематики эруптивных структур, в комплексный пространственно-временной анализ излучений мощных солнечных вспышек и околоземных протонных возрастаний, а также в моделирование гиротронного излучения многопетельной системы микроволновых источников.

**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.

**В первой главе** рассмотрены существующие методики измерений кинематики эруптивных структур и распространения волновых возмущений, а также измерений параметров микроволновых всплесков и возрастаний протонных потоков СКЛ. В частности, предложен метод более точных и достоверных измерений временных профилей скорости и ускорения эруптивных структур и волновых возмущений, основанный на аппроксимации измерений положения источника аналитической функцией. Метод демонстрирует стабильное поведение наблюдаемой структуры без артефактов, зачастую возникающих при использовании методов, основанных на дифференцировании.

**Вторая и третья главы** содержат результаты исследований двух мощных солнечных эруптивных событий, 13.12.2006 и 26.12.2001, вызвавших интенсивные потоки протонов СКЛ высоких энергий, включая GLE. Обе вспышки были двухленточными (аркадными) и экстремальными по многим другим параметрам. В частности, частота спектрального максимума микроволнового излучения в отдельные интервалы времени превышала 34 ГГц, его источники были оптически толстыми не только на 17 ГГц, но и на 34 ГГц. Установлено, что именно в эти интервалы времени вспышечные ленты заходили в тени пятен с сильным магнитным полем. В диссертации подчеркивается фундаментальное значение этого факта в определении экстремальных свойств вспышек и их протонной продуктивности.

Наиболее яркое впечатление во второй главе произвели результаты измерения кинематики эруптировавших структур во вспышке 13.12.2006, о которых я уже упоминал выше. В целом эти результаты подтвердились и при исследовании вспышки 26.12.2001, подробный анализ которой проведен в третьей главе. В частности, дрейф всплесков II типа также согласован с распространением ударных волн, возбужденных импульсно-поршневым механизмом. Показано, что, по крайней мере, до 15Rs ударная волна была в промежуточном режиме между взрывной и головной.

Интересными представляются результаты третьей главы, относящиеся к анализу эволюции частотного спектра и пространственной динамики аркад вспышечных петель, наблюдавшихся в микроволновом диапазоне и в ультрафиолетовом диапазоне. По данным радиогелиографа Нобеяма и ультрафиолетового телескопа TRACE было обнаружено, что эффективные центры яркости источников на 17 ГГц и вспышечных лент, видимых в канале 1600 Å, вначале сближались вдоль нейтральной линии, а затем расходились от неё. Подобие этих движений указывает на расположение неразрешенных микроволновых источников в

основаниях многих петель вспышечной аркады. Этот вывод подтверждён моделированием радиоизображений как результат свёртки УФ изображений с диаграммой направленности NoRH. Они оказались близки к реально наблюдавшимся радиогелиографом на 17 ГГц. Некоторые отличия объяснены разной зависимостью микроволнового и УФ излучения от напряжённости магнитного поля. В результате проведенного моделирования диссертанту удалось успешно согласовать наблюдаемое постоянство формы микроволнового спектра со значительным (в 18 раз!) возрастанием потока излучения.

**В четвертой главе** исследовано 11 эруптивных событий, сопровождавшихся ударными волнами и потоками протонов СКЛ. В целом подтверждены выводы второй и третьей глав о том, что эрупции плазмы в нижней короне приводят к развитию ударной волны, похожей на взрывную. Именно на ней возможно ускорение протонов, причем намного раньше, чем возможное ускорение ударной волной, возбужденной внешней поверхностью КВМ.

Особый интерес в этой главе представляют результаты исследования эффекта задержки выхода протонов СКЛ. Согласно анализу дисперсий скоростей энергичных частиц, их выход в межпланетное пространство происходит на удалении от Солнца в несколько  $R_s$ . В настоящее время это считается подтверждением сценария, в котором протоны СКЛ ускоряются головной ударной волной, возбужденной внешней поверхностью КВМ на расстоянии  $(1-2)R_s$ . Проведенный в Главе 4 анализ показал, что время выхода энергичных протонов от Солнца соответствует всплескам III типа в декаметровом и гектометровом диапазонах. В результате высказана интересная гипотеза переноса в расширяющемся магнитном жгуте электронов и протонов, ускоренных в процессе вспышки, до места встречи жгута с открытой магнитной структурой, где происходит пересоединение силовых линий поля и выход частиц в межпланетное пространство. Данная гипотеза хорошо согласуется с концепцией ускорения энергичных протонов во вспышечной области, а не высоко в короне на головной ударной волне.

**В Главе 5** анализируются соотношения между солнечными микроволновыми всплесками, зарегистрированными радиополяриметром Нобейма на частоте 35 ГГц, и потоками протонов СКЛ с энергиями  $> 100$  МэВ. Статистический анализ этих соотношений выявил наивысшую корреляцию для событий с мощными всплесками  $F_f > 1000$  с.е.п. между микроволновыми и протонными флюенсами, присутствующую в диапазоне нескольких порядков величины. Этот факт предполагает преобладание вспышечного ускорения протонов совместно с ускорением электронов. Приводятся аргументы в пользу того, что в событиях с экстремально большими отношениями  $I_p(>100\text{МэВ})/F_f(35\text{ГГц})$  происходит дополнительное ускорение протонов на ударных волнах.

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

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использовать в дальнейших исследованиях: а) полученные фундаментальные научные результаты; б) разработанную в диссертации более совершенную методику измерения кинематики эруптивных структур; в) подготовленный каталог параметров эруптивных событий. Установленные эмпирические закономерности связи параметров протонных потоков и микроволновых всплесков могут быть использованы в целях диагностики и прогноза явлений космической погоды. На мой взгляд, разработанные подходы и методики могут послужить хорошим катализатором для многих будущих исследований по диагностике проявлений солнечной активности, ведущихся в нашей стране и за рубежом. Думаю, что

результаты диссертационной работы будут очень востребованы в ГАО РАН, НИРФИ, ФТИ РАН, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, МИФИ, ИПФ РАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН и других организациях, в которых проводятся исследования по данной тематике.

**Заключительные замечания:**

Диссертационная работа производит впечатление очень добротного исследования, в котором практически каждый этап методически выверен, а проводимый анализ данных и выводы достаточно детально обоснованы. Я, пожалуй, не знаю другого такого же комплексного и подробного анализа отдельных солнечных вспышечных событий, сопровождаемого глубокими физическими выводами, какой проведён в данной работе. В целом по проведенному исследованию у меня нет принципиальных замечаний. Хотя, безусловно, вполне можно найти мелкие недочеты в любой работе. Но они, как правило, не являются принципиальными при оценке основных результатов соискателя.

Профессионализм и личный вклад В.И. Киселёва известен специалистам, работающим в области восстановления структуры коронального магнитного поля. Результаты диссертации прошли тщательную научную экспертизу. Они докладывались автором на многих российских конференциях, опубликованы в научных журналах, рекомендуемых ВАК.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По моему мнению, диссертационная работа Валентина Игоревича Киселёва является завершённой научной работой и содержит важные новые результаты. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее 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

12.03.2018 г.

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



Т.П. Борисевич



