

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации И.Н.Шарыкина  
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО  
МНОГОВОЛНОВЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗРЕШЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.03.03 – Физика Солнца

С появлением новых данных о процессах энерговыделения на Солнце, полученных с помощью космических аппаратов и наземных оптических наблюдений, возникла необходимость пересмотра так называемой «стандартной модели» солнечной вспышки. Оказалось, что значительную роль в первоначальном вспышечном энерговыделении играют фотосфера и хромосфера Солнца. В настоящее время существует несколько международных программ изучения солнечной хромосферы, например, программа «Солнечные вспышки и хромосфера» (Hudson et al. 2011). В самом деле, в отличие от полностью ионизованной плазмы солнечной короны частично ионизованная плазма хромосферы обладает рядом особенностей. Например, диэлектрическая проницаемость хромосферы больше единицы, поэтому, в отличие от короны в ней возможен эффект Вавилова-Черенкова на релятивистских частицах. Электрическое сопротивление (Каулинга) в хромосфере на 7-9 порядков превышает сопротивление короны (Спитцера), что приводит к повышенной диссипации электрических токов.

Очевидно, что без многоволновых исследований вспышек с предельным пространственным разрешением невозможно получить новую информацию о процессах энерговыделения. Диссертант привлекает самые современные наблюдения вспышек в радио, оптическом, рентгеновском и ультрафиолетовом диапазоне. При этом уникальная информация о хромосферных вспышечных лентах получена И.Н.Шарыкиным из оптических наблюдений на телескопе NST/BBSO с разрешением порядка  $0.1''$  дуги.

Поэтому задачи диссертации, состоящие в исследовании сверхгорячей плазмы во вспышках и её влияния на эффективность ускорения электронов, в изучении тонкой пространственной структуры вспышечной области и в выяснении роли электрических токов во вспышечном энерговыделении, представляются весьма актуальными.

Первые две главы работы посвящены исследованию сверхгорячей плазмы в двух вспышках, различных по мощности и топологии. Многопетлевая вспышка 9 августа 2011 г., сопровождавшаяся корональным выбросом массы, сравнивается с простой (single loop) неэруптивной вспышкой 12 августа 2002 г. Анализируя энергетику первой вспышки, диссертант приходит к выводу, что однотемпературная модель (Thomas et al. 1985) не

отвечает данным наблюдений и предлагает модель, в которой в вершинах магнитных петель возникает сверхгорячая ( $\sim 45$  МК) плазма, а вне этой области – горячая с температурой  $< 20$  МК. И.Н Шарыкин считает, что за пониженную теплопроводность между сверхгорячей и горячей областями плазмы ответственна плазменная турбулентность, возбуждаемая пучками ускоренных при вспышке электронов.

Нужно заметить, что вспышечная петля является пробкотроном для высокоэнергичных частиц, формирующих распределение с «конусом потерь». Их плотность в вершине петли может превысить плотность «высыпающихся» частиц. Поэтому не исключено, что конусная неустойчивость волн верхней гибридной частоты может давать бóльший вклад в аномальную теплопроводность.

Однопетлевые вспышки дают возможность исследовать процессы ускорения частиц и нагрева плазмы в упрощённой геометрии магнитного поля и динамике излучения. Диссертант выбрал безэруптивное событие 1 августа 2002 г., для которого, тем не менее, имелось достаточное количество наблюдательных данных, полученных как космическими, так и наземными обсерваториями. Важно, что и в этом случае была выявлена сверхгорячая ( $> 30$  МК) плазма, причём нагрев плазмы происходил перед началом ускорения электронов. Детально анализируя вспышку 1 августа 2002 г., И.Н.Шарыкин приходит к выводу о том, что популяция ускоренных электронов формируется из популяции электронов сверхгорячей плазмы.

Во второй главе диссертант, к сожалению, не обсуждает принципиальный вопрос о величине электрического тока ускоренных электронов. В самом деле, из Рис.2.5 следует, что ускорительный механизм производит в секунду  $\geq 10^{34}$  электронов, поэтому возникает электрический ток  $I = e(dN/dt) \geq 10^{15}$  А. Протекая в магнитной петле с сечением  $\sim 10^{16}$  см<sup>2</sup>, этот ток должен индуцировать магнитное поле  $B \approx 10^7$  Гс (парадокс Колгейта). Эту проблему исследовал также Melrose (ApJ, **451**, 391, 1995). Возможность устранения такого парадокса связана с образованием обратного тока в плазме (например, Hammer & Rostoker, Phys. Fluids, **13**, 1831, 1970; Lee & Sudan, Phys. Fluids, **14**, 1213, 1971; Lovelace & Sudan, Phys. Rev. Lett. **27**, 1256, 1971). Правило Ленца позволяет пучку ускоренных электронов распространяться в плазме, не затрачивая энергию на модификацию магнитного поля.

Наиболее важному, по моему мнению, для физики Солнца результату, полученному диссертантом, посвящена третья глава. С помощью нового оптического телескопа (NST) солнечной обсерватории BBSO И.Н.Шарыкину удалось наблюдать в событии 15 августа 2013 г. сверхтонкую структуру тонких  $\text{H}\alpha$  вспышечных лент, состоящих из множества ярких



узлов с размером порядка 100 км. Анализируя данные космических аппаратов GOES, SDO и FERMI диссертант приходит к заключению, что нагрев оснований вспышечных петель в нижней атмосфере Солнца происходит без участия ускоренных высокоэнергичных частиц, а некоторым дополнительным источником нагрева. В диссертации делается важный вывод о том, что источником нагрева *in situ* может быть Джоулева диссипация электрических токов. Однако в оценках эффективности нагрева токами Н.И.Шарыкин не вполне обоснованно полагает магнитное число Рейнольдса порядка единицы, хотя лучше было бы определить проводимость Педерсена. Тем не менее, полученные в диссертации оценки мощности диссипации  $\sim 10^{17}$  Вт при токах  $\sim 10^{11}$  А и сопротивлении  $\sim 10^{-5}$  Ом представляются вполне разумными.

В качестве причины формирования компактных ( $\sim 100$  км) узлов вспышечных лент диссертант предлагает резистивную тиринг-неустойчивость, которая приводит к филаментации токового слоя. Заметим, что образование таких узлов – оснований компактных магнитных трубок, возможно также из-за перестановочной неустойчивости типа неустойчивости Рэля-Тейлора. В результате вспышечная лента распадается на систему магнитных трубок с радиусом порядка толщины слоя, которые формируют в короне аркаду магнитных петель.

Четвёртая глава посвящена исследованию роли электрических токов в плотных слоях атмосферы Солнца во вспышечном энерговыделении и генерации гелиосейсмического возмущения. В предыдущей модели гелиосейсмического возмущения предполагалось, что за возмущение ответственны проникающие в плотные слои солнечной атмосферы ускоренные электроны, которые генерируют звуковые волны, распространяющиеся вглубь Солнца (А.Г.Косовичев, 2014). Для анализа гелиосейсмического возмущения диссертант выбрал петлеобразную вспышку 17 февраля 2013 г. класса C, для которой не наблюдалось насыщение ультрафиолетовым излучением ПЗС матрицы прибора AIA/SDO. Многоволновый анализ события позволил диссертанту сделать вывод о том, что «солнцетрясение» возникает в области с сильными электрическими токами, а не в области повышенного жёсткого рентгеновского излучения, то есть гелиосейсмическое возмущение генерируется не за счет вторжения ускоренных частиц в плотные слои атмосферы Солнца. И.Н.Шарыкин предполагает, что триггером быстрой диссипации электрических токов могут быть потоки ускоренных протонов, поскольку, по оценкам диссертанта, величина импульса ускоренных электронов недостаточна. Глава завершается важным выводом о том, что не только вспышечное энерговыделение, но и гелиосейсмические возмущения в фотосфере обусловлены повышенной диссипацией электрических токов.

В целом диссертация является современным многоволновым (оптика, рентген, радио) исследованием процессов энерговыделения на Солнце, в котором впервые была обнаружена сверхтонкая структуры вспышечных лент и успешно применён эффективный подход к описанию вспышек на языке электрических токов. Более того, в диссертации указаны противоречия в «стандартной» модели солнечной вспышки и предложены оригинальные подходы для понимания физики вспышечного энерговыделения и гелиосейсмических возмущений. Диссертация полностью отвечает критериям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Материалы диссертации содержатся в девяти статьях, опубликованных в ведущих мировых и отечественных изданиях, и могут привлекаться для исследовательских работ в ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, КраО, ИСЗФ СО РАН, ГАО РАН, САО РАН, ИПФ РАН, ФИАН, ФТИ РАН. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а её автор, И.Н.Шарыкин, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.03.03 – физика Солнца.

5 ноября 2015 г.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук  
научный руководитель ГАО РАН, чл.корр. РАН

А.В.Степанов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Почтовый адрес: 196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, ГАО РАН.  
Телефон 812-363-70-03, эл. почта: stepanov@gao.spb.ru

Подпись А.В.Степанова заверяю

Учёный секретарь ГАО РАН  
кандидат физико-математических наук



Т.П.Борисевич