

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Дмитрия Андреевича Жданова
**«МИКРОВОЛНОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ
СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ
СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА 4–8 ГГц»**,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.03 «Физика Солнца»

Диссертационная работа Д.А. Жданова посвящена разработке и созданию спектрополяриметра частотного диапазона 4–8 ГГц с высоким временным и спектральным разрешением, а также исследованию пространственных и спектрально-временных характеристик тонких структур микроволнового излучения, зарегистрированного этим спектрополяриметром.

Актуальность диссертационной работы связана с появлением в последние годы совершенно новых типов наблюдений, связанных, прежде всего, с инструментами, имеющими высокое пространственное разрешение, а также с появлением новых теоретических разработок, показывающих большую потенциальную эффективность микроволновых наблюдений, и насущной необходимостью привлечения спектрально-поляризационных данных о микроволновом излучении солнечных вспышек к анализу данных об их пространственной структуре. Такой комплексный подход способствует углублению нашего понимания механизмов солнечных вспышек, места, времени и условий ускорения электронов до высоких энергий.

В этой связи в первую очередь хочется отметить такой важный результат диссертационной работы, как создание нового радиотелескопа-спектрополяриметра для исследования микроволнового излучения солнечных вспышек в диапазоне частот 4–8 ГГц с высоким временным и спектральным разрешением. Насколько я знаю, такой микроволновый спектрометр создан впервые в России. О подобном инструменте давно мечтали и даже создавали в некоторых институтах (например, в НИРФИ), но ни разу спектрометр не был доведен до состояния патрульного автоматизированного аппаратурно-программного комплекса, проводящего регулярные, ежедневные наблюдения. Созданный при участии автора спектрополяриметр ведет наблюдения Солнца в правой и левой поляризации параллельно на 26 фиксированных частотах (с полосой 80-120 МГц) с 10 мс временным разрешением. Автором разработаны и внедрены методики калибровки, архивирования и обработки результатов наблюдений. Замечательно то, что создан ежедневно обновляемый архив оригинальных микроволновых спектральных данных, находящийся в свободном доступе через глобальную сеть Интернет для любого потенциального пользователя.

Из результатов, полученных при анализе данных наблюдений на этом спектрополяриметре, особо хочу отметить результат, относящийся к статистике микроволновых всплесков с тонкой спектрально-временной структурой. Сама по себе тонкая структура микроволновых всплесков давно известна. Обычно к ним относят всплески с длительностью от миллисекунд до десятков миллисекунд и с полосой 1-5%. Механизм генерации таких структур – когерентный плазменный или циклотронный. Для генерации обычно требуются пучки электронов с неравновесным распределением по энергиям или pitch-углам. Однако, здесь интересна статистика, полученная диссертантом. Им показано,

что из всех 235 солнечных микроволновых всплесков, зарегистрированных в 2011–2012 гг на Спектрополяриметре 4–8 ГГц, в 120 (51%) событиях тонкой структуры нет, в 74 (32%) событиях тонкая структура наблюдалась на фоне континуального всплеска, а еще в 41 (17%) событиях тонкая структура наблюдалась на фоне спокойного Солнца и не сопровождалась континуальным микроволновым всплеском. О типе событий последней группы ранее в литературе не сообщалось. Эта находка является совершенно новой. Вызывает сожаление, что диссертант ограничился простой констатацией факта и никак не обсудил физическое происхождение такого типа событий. Вместе с тем, в диссертации отмечается, что основная масса зарегистрированных кратковременных узкополосных всплесков относится к дрейфующим по частоте структурам, то есть, они генерируются продольными к магнитному полю пучками электронов. А это, на мой взгляд, делает полученные статистические результаты очень важными с точки зрения механизма ускорения электронов во вспышках. Они свидетельствуют о том, что ускорение электронов с очень высокой продольной анизотропией является достаточно редким явлением (~ 17%). По-видимому, более характерным для вспышек является ускорение (и последующее рассеяние) в широком конусе пичч-углов, при котором ускоренные электроны захватываются в магнитную ловушку и генерируют излучение в широком спектре за счет ГС механизма излучения.

Характер решения поставленных задач определил структуру диссертации.

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 приведено описание принципов работы Спектрополяриметра 4–8 ГГц, разработанного в РАО ИСЗФ СО РАН. Приведены важнейшие спектральные характеристики приемника: ширина полосы каждого фильтра и его рабочая (центральная) частота. Обсуждены методы обработки данных, полученных с помощью этого инструмента. Представлено описание программно-методического комплекса обработки данных, созданное диссертантом. Приведено описание организации архива наблюдений со свободным доступом в Интернет.

Вторая глава посвящена результатам статистического исследования тонких временных и спектральных структур микроволнового излучения по данным Спектрополяриметра 4–8 ГГц. Мои комментарии по результатам этой главы приведены выше.

Локализация источников всплесков микроволнового излучения, особенно источников излучения с тонкой спектрально-временной структурой, является большой проблемой из-за явного недостатка наблюдений на инструментах, способных регистрировать их с высоким пространственным разрешением. Определенные успехи в решении этой проблемы достигнуты в диссертационной работе Д.А. Жданова. **Третья глава** содержит изложение результатов определения положения и размеров источников микроволнового излучения в трёх конкретных солнечных вспышках по данным ССРТ.

В разделе 3.1 оценены размеры источника микроволновых всплесков III типа в полосе частот 4–8 ГГц во вспышке 10.08.2011. Впервые установлено, что размер источника микроволновых всплесков III типа имеет максимум на 5.1 ГГц и уменьшается как на более высоких, так и на более низких частотах в пределах диапазона 4–8 ГГц. Особый интерес в этом разделе представляет оригинальный метод оценки размеров источника тонких структур микроволнового излучения, основанный на анализе наблюдений трех радиоинструментов:

ССРТ, Спектрополяриметра 4–8 ГГц и РАТАН-600. Разработанный автором новый метод позволил найти двумерное положение источника микроволновых всплесков III типа на частоте 5.7 ГГц, а также одномерные положения источников и их размеры на 8-ми частотах в диапазоне 4.5-6 ГГц.

В разделе 3.2 описаны результаты определения местоположения микроволнового источника широкополосных квазипериодических пульсаций (КПП) с периодом 7.5 с во вспышке 8 марта 2012г с привлечением данных ССРТ и Спектрополяриметра 4-8 ГГц, а также других доступных данных наблюдений (радио, рентген, УФ). Автор сделал добротный анализ данных с использованием методов многоволновой диагностики. В результате было показано, что источник пульсаций находится в вершине УФ (магнитной) петли и не совпадает с центром радиояркости источника континуального микроволнового излучения, а его размеры меньше размеров континуального источника. Более того, было проведено математическое моделирование радиопулсаций в предположении разных физических механизмов КПП (модуляция гиросинхротронного (ГС) излучения БМЗ волнами типа радиальных, изгибных и торсионных, а также модуляция процесса ускорения этими волнами). Выводы моделирования сравнены с характеристиками КПП и сделан окончательный вывод, что наиболее вероятным сценарием возникновения пульсаций является процесс модуляции ускорения нетепловых частиц МГД-процессами. Здесь я хочу сделать замечание. На мой взгляд, гипотеза модуляции ГС излучения радиальной (сосисочной) модой БМЗ колебаний отвергнута слишком поспешно и некорректно. На стр.67 автор заявляет: *«... при этом надо помнить, что рост как площади, так и напряженности магнитного поля увеличивает величину микроволнового потока. Однако, по данным ССРТ изменения в размерах микроволнового источника КПП не были обнаружены»*. На самом деле то, что *«по данным ССРТ изменения в размерах микроволнового источника КПП не были обнаружены»* не может быть решающим аргументом. Причина здесь простая. По оценкам автора, для объяснения наблюдаемой глубины модуляции микроволнового (ГС) излучения требуется изменение поля от 220 Гс до 260 Гс, то есть, на 20%. На столько же должна уменьшиться площадь поперечного сечения трубки магнитного поля (источника КПП). Значит, видимый размер источника КПП уменьшится на 10%. При измеренной площади $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^2$, размер источника равен $4.5 \cdot 10^8 \text{ см}$ или 6 угл.сек, а его уменьшение на 10% равно 0.6 угл.сек. Очевидно, что ССРТ, при его ширине диаграммы, равной 20 угл.сек, принципиально не способен обнаружить такие незначительные изменения размера источника КПП. В то же время, колебания магнитного поля будут приводить в 4-5 раз более сильные изменения интенсивности ГС излучения, чем соответствующие противофазные колебания толщины источника КПП.

В разделе 3.3 рассмотрены результаты анализа спектральных наблюдений Спектрополяриметром 4–8 ГГц события 29.06.2012 г., в котором по данным наблюдений ССРТ микроволновое излучение основного источника всплеска сопровождалось микроволновым излучением источника, удаленного от основного на 44 угл.сек. Было убедительно показано, что с помощью спектральных наблюдений в диапазоне 4–8 ГГц, сделанных одиночной антенной, и с привлечением двумерных наблюдений (ССРТ) на фиксированной частоте 5.7 ГГц можно выделить спектры двух пространственно-разнесенных источников. Одновременные пространственные и спектральные наблюдения впервые позволили определить всплещечный микроволновый спектр для каждого источника и определить, что электроны, ускоренные в основном источнике, возможно, являются причиной вторичного источника.

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

Практическая ценность работы заключается в возможности использовать в текущих и будущих исследованиях результаты регулярных наблюдений солнечной активности на созданном при участии диссертанта аппаратурно-программном комплексе «Спектрополяриметр 4–8 ГГц». Разработанные им программы и методики обработки и анализа данных наблюдений на Спектрополяриметре 4–8 ГГц совместно с данными инструментов других обсерваторий обеспечивают выполнение комплексных многоволновых исследований процессов в солнечных вспышках. Следует отметить в этой связи организованный автором свободный доступ к данным через глобальную сеть Интернет. Это, безусловно, принципиально правильное решение. Международный опыт (NoRH, RHESSI, SDO, и другие обсерватории) убедительно свидетельствует о высокой научной эффективности политики открытых данных. Количество публикаций и полученных результатов с использованием такой политики возрастает в десятки раз.

На мой взгляд, разработанные аппаратура, подходы и методики могут послужить хорошим катализатором для многих будущих исследований по диагностике проявлений солнечной активности, ведущихся в нашей стране и за рубежом. В частности, многочастотные измерения круговой поляризации микроволнового излучения вспышек позволят вплотную подойти к решению таких актуальных в настоящее время задач физики ускорения и кинетики электронов во вспышечных петлях, как 1) оценка степени анизотропии энергичных электронов в микроволновом источнике; 2) выяснение роли позитронов в генерации микроволнового излучения вспышек; 3) определение роли эффекта квазиперечного распространения; 4) определение взаимной роли самопоглощения и эффекта Разина.

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

Заключительные замечания:

Диссертационная работа производит хорошее впечатление, структура логична, текст написан ясным языком. Каждый крупный раздел начинается с информативного обзора состояния исследований по тематике главы. Читать диссертацию было интересно и познавательно. Проводимый анализ данных достаточно детален и методически выверен, выводы обоснованы.

Наряду с общим хорошим впечатлением от диссертации, отмечу также некоторые недочеты.

1) Меня несколько удивило то, что в Главе 1 при описании обработки данных Спектрополяриметра 4-8ГГц практически ничего не говорится о процедуре абсолютной калибровки, хотя в выводах к Главе 1 указывается, что процедуры относительной и абсолютной калибровок описаны в этой главе. В выводах отмечается, что в качестве абсолютной калибровки сейчас используется привязка к данным Радиобсерватории Нобеема. Не совсем понятно, почему нельзя было внедрить свой метод. Тем более, что для микроволнового диапазона в нашей стране (в НИРФИ группами Троицкого и Цетлина) давно развит достаточно качественный метод абсолютной калибровки по небу (по яркостной температуре при наведении антенны в зенит). Этот метод активно использовался на системе радиотелескопов Радиослужбы Солнца СССР на РАС НИРФИ «Зименки» и показал точность, сравнимую с получаемой на радиотелескопах в Тоёкаве/ Нобееме.

2) В обзорной части Главы 3, где описываются пространственно-разрешенные наблюдения источников тонких структур солнечного радиоизлучения, я не обнаружил ссылок на пионерские работы отечественных радиоастрономов в этой области. В частности, не упоминаются результаты группы радиоастрономов НИРФИ, активно исследовавшей в 1990-е годы всплески с тонкой структурой методами РСДБ и получившими интересные результаты, касающиеся как пространственно-временной фрагментации источников, так и скоростей перемещения источников отдельных элементов тонкой структуры.

3) В списке цитируемой литературы ряд ссылок оформлен некорректно.

Безусловно, перечисленные недочеты не являются принципиальными при оценке основных результатов соискателя.

Профессионализм и личный вклад Д.А. Жданова известен специалистам, работающим в области солнечной радиоастрономии. 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 Дмитрия Андреевича Жданова является завершенной 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

12.10.2018 г.

Адрес: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе 61,
Телефон, e-mail: +7-903-058-3012, v.melnikov@gaoran.ru

Подпись Мельникова В.Ф.

заверяю

Ученый секретарь ГАО РАН

к.ф.-м.н



П. Борисевич