

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Лесового Сергея Владимировича «Результаты исследований микроволнового излучения Солнца: Инструментарий и наблюдения», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

За почти 30 лет, посвящённых двум инструментам, ССРТ и СРГ, диссертант проделал колоссальную многоэтапную созидательную работу. Это модернизация ССРТ, создание макета будущего радиогелиографа и, наконец, разработка и создание современного СРГ. При этом на каждом этапе работа С.В. Лесового сопровождалась важными научными результатами, полученными на основе оригинального наблюдательного материала.

Первые две главы посвящены модернизации ССРТ, созданного по инициативе и под руководством Г.Я. Смолькова, и макету нового многоволнового радиогелиографа. Судя по «очищенным» изображениям диска Солнца, разрабатываемый с 60-х годов моночастотный (5,73 ГГц) ССРТ проигрывал NoRH и VLA, получающих более качественные карты Солнца. Поэтому возникла необходимость создания современного широкодиапазонного радиогелиографа. В то же время С.В. Лесовому удалось модернизировать ССРТ и получить ряд важных результатов о свойствах различных фаз вспышек и особенностях тонкой структуры их радиоизлучения. Совмещение широкого поля зрения с высоким пространственным разрешением, необходимое для получения быстрых изображений Солнца, привело диссертанта к выводу о создании радиотелескопа апертурного синтеза с большим числом антенн небольшого диаметра. Сначала был создан 10-антенный макет СРГ, затем 48-антенный синтезирующий инструмент в интервале частот 4-8 ГГц. Оптимальным, по мнению диссертанта, является диапазон 3-24 ГГц, поделённый на три октавы, что привело к конфигурации из трёх типов антенн и трёх Т-образных антенных решёток.

В третьей главе показаны возможности СРГ в решении современных задач физики Солнца, для которых необходимы изображения и спектры радиоизлучения источников в каждой области диска Солнца с высоким пространственным, частотным и временным разрешением. В диссертации сформулированы основные требования, которым должен удовлетворять СРГ. К ним относятся, например, большой динамический диапазон 10^3 , временное разрешение не хуже 1 с и возможность наблюдений в двух круговых поляризациях. Повышенные требования к радиотелескопу нового поколения выявили необходимость решения сложных технических задач, которые успешно решил С.В. Лесовой. Это и переход от волноводов к волоконной оптике, создание цифровых приёмников многоволнового гелиографа с регистрацией двух круговых поляризаций, компенсация геометрических задержек, коррекция разности фаз (фазирование такого сложного инструмента - непростая задача), программное обеспечение СРГ -телескопа апертурного синтеза, включая программы чистки изображений солнечного диска и его фрагментов.

В четвёртой главе диссертации представлен ряд важных физических результатов на модернизированном ССРТ. Радиоастрономические способы определения величины и конфигурации магнитных полей в активных областях Солнца являются в настоящее время наиболее надёжными, в частности, применяемый диссертантом метод корональной магнитографии. Величина поперечной компоненты магнитного поля, 15-25 Гс на высотах 70-140 тыс. км от фотосферы, где возможна смена знака поляризации излучения, получена в диссертации методом стереоскопии. На высоте 130-140 тыс. км над пятнами определены значения магнитных полей, которые порядка 30-40 Гс. Комбинацией данных ССРТ, РАТАН-

600 и NoRH построена 3D-структура корональных источников. При этом для определения высоты гирорезонансного источника использовался метод вращения Солнца.

В диссертации получены свидетельства появления ускоренных электронов на предимпульсной стадии вспышки. На примере пяти событий определены практически все физические важные параметры источников, включая характеристики электронов, ускоренных до энергий 2 МэВ. Получены указания на наличие электрических полей, ускоряющих заряженные частицы. Определена величина плазменного параметра $\beta \ll 1$, что свидетельствует о достаточно хорошем удержании плазмы в источниках. Выявлено также отсутствие процесса «испарения» хромосферы на ранней стадии вспышки, что не согласуется со «стандартной» моделью вспышки. На длине волны 5,2 см за период 2000-2003 гг. получены размеры и координаты около ста источников быстропротекающих (≤ 1 с) событий и определен преимущественный тип волны у источников - обыкновенная мода, что свидетельствует о плазменном механизме радиоизлучения. Это весьма необычно для излучения Солнца на длине волны около 5 см. Общепринятым механизмом излучения всплесков радиоизлучения Солнца на этих длинах волн считается гиротронный механизм.

В пятой главе изложен ряд интересных оригинальных результатов, полученных на 48-антенном макете СРГ и на созданном СРГ. Во-первых, это всплески в поглощении, которые, как обнаружил диссертант, вызваны экранированием гирорезонансного излучения источников выбросами компактных волокон, содержащих плотную холодную плазму. Во-вторых, благодаря высокому пространственному разрешению двух радиотелескопов, СРГ и EOVSA, удалось определить размер источника всплеска 11 мая 2023 г. в активной области NOAA13294, $\sim 2,2''$, что позволило оценить яркостную температуру 6×10^{10} К и сделать вывод о его когерентной природе. В диссертации предложен механизм излучения – электронный циклотронный мазер (ЕСМ) на второй гармонике гирочастоты электронов. При этом предположено, что всплеск генерируется «полый» по скоростям популяцией энергичных электронов при наклонной инжекции электронов в корональную петлю.

Здесь нужно заметить, что на инкремент неустойчивости ЭЦМ больше влияет не сама форма распределения электронов (hollow beam или horseshoe), а величина конуса потерь магнитной петли – ловушки с магнитными пробками. Кроме того, при определении исходного потока радиоизлучения нужно учесть циклотронное поглощение радиоволн в короне на гироуровнях $s\omega_c$, $s = 3, 4$, которое незначительно лишь в узких «окнах» вдоль магнитного поля (Stepanov et al. ApJ 524, 961, 1999, DOI 10.1086/307835). Для выхода излучения через «окна» необходимо индуцированное рассеяние волн, генерируемых ЭЦМ (Зайцев и др. Астрон. журн. 82, вып. 4, 368, 2005).

В целях диссертационной работы указаны, в частности измерения корональных магнитных полей. Однако диапазон СРГ с максимальной частотой 24 ГГц (длина волны 12,5 мм) позволяет исследовать и более глубокие слои солнечной атмосферы, например, переходную область - terra incognita, вблизи которой начинаются процессы вспышечного энерговыделения.

По поводу поляризации секундных и субсекундных всплесков укажем, что, преобладание в их излучении обыкновенной волны может быть не только из-за плазменного механизма радиоизлучения, но и, как указано в диссертации, при распространении излучения через область квазипоперечного магнитного поля. Однако есть еще одна интересная возможность для излучения в виде обыкновенной моды – более узкие окна выхода радиоизлучения вдоль магнитного поля для необыкновенной моды (в 100 раз по сравнению с обыкновенной) из-за циклотронного поглощения в тепловой плазме на уровнях $2\omega_c$ и $3\omega_c$. Дело в том, что генерируемое ЭЦМ излучение не попадает в эти окна, а

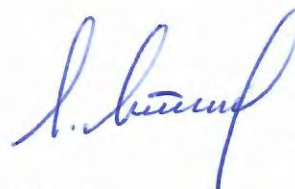
индуцированное рассеяние радиоволн образует конденсат излучения вблизи «окон» выхода. При этом наиболее благоприятные условия для выхода реализуются для обыкновенных волн (Stepanov et al ApJ 1999; Зайцев и др. АЖ 2025). Поэтому поляризация выходящего излучения должна соответствовать обыкновенной волне.

На стр.143 при описании зебра-структуры применено не очень удачное выражение: «на поверхностях двойного плазменного резонанса, распределённых поперёк петли». Не поперёк, а вдоль петли, то есть в различных по высоте частях вспышечной петли (см. рис.6 в УФН 186, №10, 1090, 2016. DOI: 10.3367/UFNr.2016.05.037813)

В настоящее время замечательной комбинацией радиогелиографа с динамическим спектрографом в метровом диапазоне длин волн обладает LOFAR, который регистрирует процессы, происходящие в средней и высокой короне Солнца. У СРГ на частотах 3-24 ГГц имеется возможность изучать не только корону, Солнца, но и переходную область. Важно, что на одной площадке ИСЗФ СО РАН в ур. Бадары вместе с СРГ работает широкодиапазонный (50-3000 МГц) спектрополяриметр. Это позволяет проследить динамику активных солнечных событий от верхней хромосферы до высоких, $\sim 2R_{\odot}$, слоёв короны.

Высказанные замечания ни в коей мере не снижают ценность настоящей диссертационной работы. Создание радиотелескопа нового поколения – СРГ, открывает широкие возможности для исследования высокоэнергичных процессов на Солнце, влияющих на космическую погоду и климат Земли: вспышки, выбросы корональной массы, генерация высокоэнергичных частиц. Создание баз данных ССРТ и СРГ также является крупным достижением данной многолетней работы. Диссертация «Результаты исследований микроволнового излучения Солнца: Инструментарий и наблюдения» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук Положением ВАК о присуждении учёных степеней. Структура диссертации, состоящей из пяти глав, логична и полно отражает этапы создания СРГ и научные результаты наблюдений. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Поставленные в диссертации задачи и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия, а её автор, Сергей Владимирович Лесовой, несомненно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

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, 65, ГАО РАН.
Телефон 812 604-98-43 доб. 70-03, эл. почта: stepanov@gaoran.ru

Подпись А.В. Степанова заверяю

Учёный секретарь ГАО РАН
кандидат физико-математических наук



О.Ю. Барсунова

6 ноября 2025 г.