

Отзыв официального оппонента

Богода Владимира Михайловича
на диссертацию Бубнова Григория Михайловича
*«ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И МАТЕРИАЛАХ КРИОГЕННЫХ
РЕФЛЕКТОРОВ»*, представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4, «Радиофизика».

Миллиметровый и субмиллиметровый диапазон является относительно новым для исследований электромагнитного излучения и его спектр частот расположен между инфракрасным и микроволновым диапазонами. Он является весьма перспективным как для большого числа направлений как фундаментальной, так и прикладной науки. Среди них, актуальные проблемы астрофизики, такие как: астрофизические исследования в радиоастрономии [Кардашев, 2017], исследования “холодной” Вселенной [Зинченко, 2018], проблемы нагрева солнечной короны [Zaitsev et al, 2020], процессы звездообразования в межзвездной среде, процессы поглощения в земной атмосфере, что важно в эпоху неустойчивого климата Земли [Кисляков, 1968], а также прикладные приложения, типа высокоскоростной связи 6G в диапазоне от 100 ГГц до 10 ТГц, томографы в медицине, приборы ночного видения и многое другое.

Вышеперечисленное указывает на высокую **актуальность** миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, и их развитие плотно связано с вопросами, обсуждаемые в данной диссертации.

Излучение на этих частотах сильно поглощается водяным паром и кислородом в атмосфере Земли, так что соответствующее космическое излучение существенно ослабляется, в связи с чем, субмиллиметровые телескопы должны быть расположены в особенно сухих и возвышенных местах.

В мире создано немало крупных и точных инструментов для исследований в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, из которых выделяется инструмент ALMA в Атакама (Чили), работающий на высоте 5100 м в диапазоне 0.2-1.5 мм. Популярные места в мире находятся для примера в Мауна-Кеа (Гавайи, США), французских Альпах, в горах Сьерра Невада и др.

В нашей стране, несмотря на наличие многих гор, существует мало мест с астроклиматом высокого качества, которое необходимо для работы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Поэтому, поиск потенциальных мест и задача подробных исследований астроклимата, поставленная в данной диссертации является **актуальной**.

Исследования астроклимата были проведены при участии и под руководством диссертанта во многих местах, таких как: гора Муус-Хая и

обсерватория ИСЗФ (Монды и Бадары), плато Суффа в Узбекистане, на Шпицбергене, на Северном Кавказе (САО РАН и КГО МГУ) и на Эльбрусе.

Для этих измерений диссертантом была использована аппаратура двух типов:

- (i) МИАП-2 (двухканальный микроволновый измеритель поглощения), который был модернизирован диссертантом с целью улучшения качества, расширения диапазона на частоты (84 – 99) ГГц и (132 – 148) ГГц, и адаптирован для работ в экспедиционном режиме с удаленным доступом;
- (ii) квазиоптический резонаторный спектрометр криогенного уровня, разработанный в ИПФ РАН в 2008г., который также был существенно модернизирован диссертантом, в результате в диапазоне 45 – 500 ГГц была достигнута высокая чувствительность по поглощению порядка $4 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$.

Среди наиболее значимых научных результатов, достигнутых диссертантом, следует отметить:

1. Модернизация **уникальной** специальной приемной аппаратуры, которая была применена диссертантом для измерения астроклимата в субмиллиметровом и миллиметровом диапазоне радиоволн в лабораторном и экспедиционном вариантах.
2. Проведение диссертантом обширных измерений астроклимата во многих пунктах на территории России, в результате чего получен **уникальный** массив данных микроволнового астроклимата нашей страны, как по географическому перекрытию, так и по высотам мест наблюдений. Проведено 11 экспедиций, в результате которых был выполнен географический охват исследований астроклимата в 22 местах **впервые в стране**, позволивший экспериментально выявить особенности микроволнового астроклимата в различных климатических зонах и высотах над уровнем моря, и сравнить параметры астроклимата в разных местах по измерениям на единой аппаратуре. Для многих пунктов экспериментально получены зависимости интегральной прозрачности атмосферы от высоты места наблюдений, а также временные характеристики астроклимата. Среди исследованных площадок выявлены три лидирующие по астроклиматическим условиям площадки: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды). Для публичного доступа опубликован полный массив полученных за 10 лет экспериментальных данных.
3. Диссертантом разработана **уникальная** методика обработки данных астроклимата, основанная на полученных радиометрических данных астроклимата, с учётом физических свойств атмосферы, частотных зависимостей интегрального поглощения. При этом, экспериментальные данные корректировались существующей моделью MPM Liebe. Определялась связь величины поглощения в основных компонентах

атмосферы с метеопараметрами, определяющие астроклимат. В результате разработанная методика обработки данных астроклимата позволила снизить ошибку расчёта оптической толщины атмосферы до 30% по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов». Автором обнаружена температурная инверсия на температурном профиле атмосферы, т.е. рост температуры в нижней тропосфере с увеличением высоты. Это указывает на высокое качество измерений поглощения, так как в этой области плотность паров воды весьма низка ($\sim 0,01 \text{ г/м}^3$).

4. Дополнительным значительным достижением явились **первые** экспериментальные наблюдения разрешённого спектра димера воды в мм диапазоне на модернизированном резонаторном спектрометре. Наблюдение этого спектра стало возможным благодаря целому ряду инноваций, внедрённых на резонаторном спектрометре силами коллектива ИПФ РАН при участии диссертанта. Эти работы являются перспективными, так как могут открыть возможности слежения за изменением климата нашей планеты, слежение за тепловым балансом нашей планеты, что сейчас является насущной проблемой.

5. Другим, **весьма важным для практических целей**, достижением, полученным на резонаторном спектрометре, явились исследования потерь на отражение от материалов при создании криогенных рефлекторов. Возможность выбора типа отражающего материала, его покрытия, при различных частотах при криогенных температурах весьма **ценно** для конструирования спутниковых обсерваторий, что было продемонстрировано на примере криогенного зеркала телескопа Миллиметрон. Этот результат показывает, что, в целом, необходимо глубокое понимание свойств материалов на терагерцевых частотах для развития физики этого направления.

6. Хотя в диссертации рассматриваются разные вопросы, (проблемы астроклимата и прикладные вопросы по измерениям димера и работы параболоида при криогенных температурах), тем не менее, **внутреннее единство** диссертации обеспечивается общей целью направленной на создание приемной техники в новом труднодоступном диапазоне частот.

В целом, *проделанная* диссертационная работа демонстрирует значительное продвижение в изучение астроклимата в широком географическом диапазоне нашей страны и является существенным достижением в освоение перспективного диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн.

На основе проведенных разработок диссертантом **предложены перспективные предложения** для развития аппаратуры: радиометрического

комплекса МИАП на 4 каналах от 3 мм до 0.8 мм и развитие резонаторной субмиллиметровой спектроскопии на базе проведенных улучшений.

Таким образом, прояснена стратегия развития исследований в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, что делает данную диссертацию законченным вкладом в будущие исследования в данном направлении.

Замечания по диссертационной работе

1. О чувствительности радиометрической аппаратуры.

В диссертации подробно описаны меры стабилизации параметров измерительной аппаратуры и указывается, что эти меры приводят к повышению чувствительности. Следует заметить, что понятие чувствительности в радиометрической аппаратуре связано с уровнем шума на входе приемника, полосой принимаемых частот и постоянной интегрирования по времени. Так как, прежде чем анализировать частотную структуру принимаемого сигнала, его нужно выделить с хорошим соотношением сигнала к шуму не менее, чем на уровне ± 3 сигм. Влияние нестабильности на уровень шумов обычно связано с недостаточным согласованием в трактах.

2. К сопоставлению условий астроклимата с данными лучших обсерваторий мира.

В диссертации сделан обзор качества астроклимата в широком географическом диапазоне страны. В этой связи, было бы уместно в работе привести сопоставление с качеством астроклимата с данными лучших обсерваторий мира. Особенно это важно для отобранных по астроклиматическим условиям площадок: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды). Такое сопоставление позволило бы оценить масштаб проблемы освоения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн для астрономии и уточнить цели этого перспективного направления в нашей стране.

3. Рис 2.26 (стр.56). Приведены зависимость СКО от времени накопления для радиометра с закрытым черным телом на входе. Отсутствуют обозначения осей. Неясен масштаб времени накопления (мин, сек, отсчеты?). Вывод автора о том, что СКО для белого шума спадает с величиной времени усреднения является тривиальным и используется автором для выбора оптимального времени накопления. Это неверно, поскольку усреднение изменяется по квадратичному закону и не может иметь четкую границу.

4. Рис 2.27 (стр.57) приводит запись собственных шумов радиометров 2 мм и 3 мм. По-видимому, это ошибка, т.к. график демонстрирует чрезмерную

часовую нестабильность усиления радиометров, что должно исключить возможность радиометрических измерений на часовых интервалах.

Изложенные выше замечания не влияют на основные результаты диссертации, и считаю, что диссертационную работу Г.М. Бубнова следует оценивать как научно-техническое исследование высокого уровня, вносящее существенный вклад в развитие фундаментальных космических и прикладных исследований.

В целом, диссертация обильно снабжена описанием технических особенностей аппаратуры демонстрирующей хороший инженерный уровень соискателя.

Замечание по оформлению диссертации.

Диссертация трудно читаема, в основном, из-за невозможности найти многочисленные ссылки.

1. Автор не использует DOI:
2. Ссылка №17 неверная.

Практическая значимость работы. Разработанные автором методы прямых измерений поглощения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере Земли на основе модернизированной диссертантом радиометрической и спектральной аппаратуры были эффективно применены для масштабных измерений астроклимата во многих географических пунктах нашей страны, что является крупным достижением для планирования освоения перспективного террагерцового диапазона частот. Результаты работ диссертанта показали эффективность разработанных методик для сложных измерений димера воды и оценок отражения миллиметрового излучения при криогенных температурах.

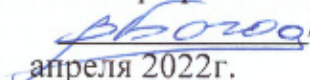
Апробация работы. Основные положения диссертации нашли отражение в 29 публикациях автора, в том числе в 7 рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 4 статьи в иностранных журналах высокого рейтинга, и 17 публикаций в трудах отечественных и зарубежных конференций. Один патент на программу для ЭВМ.

Автореферат соответствует основным положениям диссертации.

Заключение. Диссертация «Исследования поглощения волн миллиметрового диапазона в атмосфере Земли и материалах криогенных рефлекторов» отвечает требованиям пп.9-11,13,14, «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013г.), предъявляемым к кандидатским диссертациями. Считаю, что автор работы, Бубнов Григорий

Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
Главный научный сотрудник
Специальной астрофизической обсерватории РАН


 /В. М. Богод/
« 11 » апреля 2022г.

Специальная астрофизическая обсерватория Российской Академии наук
(САО РАН),

Санкт-Петербургский филиал (СПб Ф САО РАН)
196140 Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, к. 2,
раб. тел. (812)363-71-38
e-mail: vbog_spb@mail.ru

Подпись главного научного сотрудника Богода Владимира Михайловича
заверяю.

Заведующий СПб Ф САО РАН

К.ф.м.н.  /Рипак А.М./
« 11 » апреля 2022 г.

