

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.02,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 27 мая 2022 г., № 7

**О присуждении Бубнову Григорию Михайловичу, гражданину России
ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему «**Исследования поглощения волн миллиметрового
диапазона в атмосфере земли и материалах криогенных рефлекторов**»
принята к защите 18 марта 2022, протокол № 3, диссертационным советом
24.1.111.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Российской академии наук (125009, Москва, ул. Моховая. Д.11.
корп.7) (приказ Рособрнадзора о создании совета № 2397–1958 от 21.12.2007 г.;
приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 714/нк от 02.11.2012
г.).

Соискатель Бубнов Григорий Михайлович, 1989 года рождения, в 2013 году
окончил Федеральное государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). Диплом магистра-инженера по
специальности 210400 «Радиотехника».

В период с 01.10.2013 г. по 30.09.2017 г. проходил обучение в аспирантуре
НГТУ, где в июне 2014 сдал экзамены по английскому языку и философии науки.

В период с 26.04.2021г. по 26.06.2021г. был прикреплен к аспирантуре ИРЭ
РАН, в качестве экстерна сдал кандидатские экзамены по специальности 1.3.4
«Радиофизика».

Работает младшим научным сотрудником Лаборатории высокочувствительных
приемников миллиметрового диапазона (181) Федерального государственного
бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук».

Диссертация выполнена в НГТУ им. Р.Е. Алексеева и в Институте прикладной
физики РАН.

Научный руководитель: Вдовин Вячеслав Фёдорович, доктор физико-
математических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории
высокочувствительных приемников миллиметрового диапазона (181)
Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии
наук».

Официальные оппоненты:

• **Богод Владимир Михайлович**, доктор физико-математических наук,
заведующий С. Петербургским филиалом САО РАН, заведующего лабораторией
солнечных исследований СПбФ Специальной астрофизической обсерватории
Российской академии наук,

• **Розанов Сергей Борисович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела спектроскопии Физического института им. П.Н. Лебедева.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», в своем положительном отзыве, подписанном к.ф.-м.н., С.Б. Глыбовским, старшим научным сотрудником ИТМО, и утвержденном проректором по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» д.т.н. Никифоровым Владимиром Олеговичем, **отметила**, что тема диссертации Г.М. Бубнова актуальна, она представляет законченную научную работу, содержащую решение научной задачи поиска путей уменьшения потерь излучения миллиметрового диапазона в атмосфере Земли и материалах криогенных рефлекторов для практических целей радиоастрономии, телекоммуникации и спектроскопии. Полученные результаты достоверны, обладают научной значимостью и новизной.

По теме диссертации опубликовано 55 научных работ, включая 11 статей в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК и/или базы Web of Science, Scopus или РИНЦ: Известия ВУЗов. Радиофизика, Приборы и техника эксперимента, Успехи физических наук, Астрофизический Бюллетень, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 43 работы опубликованы в материалах российских и международных конференций, из них 18 входят в базы цитирования Web of Science и/или Scopus. Имеется одно свидетельство на программу для ЭВМ.

Исследования выполнялись при поддержке: Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 14-32-50455 мол_нр, 16-32-00387 мол_a); IEEE Antennas and Propagation Society Eugene F. Knott Memorial Doctoral Research Grant; Young scientist Award of the General Assembly and Scientific Symposium of URSI; получена стипендия Правительства РФ; стипендия Президента РФ; стипендия Разуваева. Общий объем опубликованных работ составляет 102 печ.л. Из них:

1. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона / В.И. Носов, О.С. Большаков, Г.М. Бубнов, В.Ф.Вдовин, И.И. Зинченко, А.С.Марухно, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А.А.Швецов // Приборы и техника эксперимента. 2016, №. 3, стр. 49–56.

Описывается радиометрический комплекс МИАП-2, предназначенный для измерения атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне длин волн (2 и 3 мм). Основу комплекса составляют два твердотельных модуляционных радиометра диапазона 84–99 ГГц и 132–148 ГГц с рупорно-линзовыми антеннами. Прибором измеряется атмосферная толщина в миллиметровом диапазоне волн с помощью метода атмосферных разрезов и метода абсолютной калибровки сигнала в полностью автоматическом режиме при удаленном контроле через Интернет. Проведена серия наблюдений в стационарном режиме, а также в условиях высокогорных экспедиций, и оценка надежности прибора по итогам двухлетней эксплуатации.

2. Searching for New Sites for THz Observations in Eurasia / Grigoriy M. Bubnov, Evgeniy B. Abashin, Oleg S. Bolshakov, Stepan Yu. Dryagin, Victor K. Dubrovich,

Andrey S. Marukhno, Vladimir I. Nosov, Vyacheslav F. Vdovin and Igor I. Zinchenko // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume: 5, Issue: 1, pp.64-73, 2015.

Представлены результаты измерений астроклимата на горе Мус-Хая, в Пущино, на плато Суффа и на площадке БТА. Предложена эмпирическая модель взаимосвязи оптической толщины с приземной влажностью. Экспериментально получена взаимосвязь оптической толщины и высоты.

3. Результаты измерения астроклимата в коротковолновой части мм диапазона на плато Суффа // Г.М. Бубнов, Ю.Н. Артеменко, В.Ф. Вдовин, Д.Б. Данилевский, И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Г.И. Шанин, Д.А.Раупов // Изв. Вузов Радиофизика, № 59, Т.8-9, Стр.852-861, 2016г.

В работе представлены результаты сезонных измерений астроклимата на месте строительства радиотелескопа РТ-70 на плато «Суффа» (2400м над уровнем моря). Наблюдения производились в автоматическом режиме каждые 11 минут в течение года, начиная с ноября 2014г. Рассмотрены кратковременные и долговременные закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы, построены статистические диаграммы. Основным результатом работы являются статистические данные астроклимата, позволяющие прогнозировать возможность радиоастрономических наблюдений в окнах прозрачности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

4. Reflectivity of metals in the millimeter wavelength range at cryogenic temperatures / V. Parshin, E. Serov, G. Bubnov // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 64, Issue 11, 2016 pp. 3828-3838.

Описаны результаты измерений потерь на отражение от металлов и металлизированных покрытий в диапазоне температур 4...300К и частот 150...250ГГц. Показано, что потери на отражение при криогенных температурах варьируются в зависимости от структуры металла.

5. New frontiers of modern resonator spectroscopy. / Maksim A. Koshelev, Igor I. Leonov, Evgeny A. Serov, Alena I. Chernova, Aleksandr A. Balashov, Grigoriy M. Bubnov, Member, IEEE, Aleksandr F. Andriyanov, Aleksandr P. Shkaev, Vladimir V. Parshin, Andrei F. Krupnov, and Mikhail Yu. Tretyakov. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume: 8 Issue: 6 pp: 773 – 783, 2018.

Представлен модернизированный вариант спектрометра Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия), обладающий чувствительностью к коэффициенту поглощения около $4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$. Спектрометр позволяет вести непрерывную регистрацию газовых спектров в диапазоне частот 45–500 ГГц (шесть волноводных поддиапазонов) при давлениях 10–1000 Торр. Полностью автоматизированная регистрация спектра в поддиапазоне волновода сокращает общее время, необходимое для эксперимента, почти на порядок. Представлены примеры записи спектров кислорода и воды.

6. Согласованное определение интегральной влажности и эффективной оптической толщины атмосферы в мм диапазоне с использованием широкополосных радиометров / Г.М. Бубнов, В.Ф. Григорьев, И.И. Зинченко, П.М. Землянуха, Г.Н. Ильин, Д.М. Кабанов, В.И. Носов, и В.Ф. Вдовин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – №. 12. – С.

В работе предложена и практически реализована методика нахождения эквивалентных частот, которые приписываются оптической толщине атмосферы, измеряемым двухканальной широкополосной радиометрической системой в мм диапазоне длин волн. Установление эквивалентной (средневзвешенной по АЧХ системы) частоты в соответствующем окне прозрачности атмосферы даёт возможность связать широкополосные измерения оптической толщины с узкополосными радиометрическими измерениями, применяемыми в стандартных расчётах интегральной влажности. Поиск эквивалентных частот производится на основе сопоставления экспериментальных данных об эффективной прозрачности атмосферы в мм диапазоне длин волн и об интегральной влажности с использованием моделирования реальной

атмосферы при помощи модели MPM Liebe.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из:

- Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) от к.ф.-м.н. Белова Ю.И. (замеч.: не определена расшифровка аббревиатуры МИАП-2, не указана география исследований, а также стилистические замечания), отзыв положительный.

- Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана от декана факультета «Фундаментальные науки», профессора кафедры физики, д.ф.-м.н. Гладышева В.О. (замеч.: в разделе «Общая характеристика работы» и в заключении есть некоторые разночтения в описании научных результатов, полученных автором в работе; в автореферате не раскрыта суть методики, позволившей снизить ошибку расчёта оптической толщины), отзыв положительный.

- Института солнечно-земной физики СО РАН от старшего научного сотрудника, к.ф.-м.н. Луковниковой А.А. (без замечаний), отзыв положительный.

- Астрономического института Академии наук Узбекистана от Ильясова С.П. (без замечаний) отзыв положительный.

- Астрокосмического центра ФИАН им. П.А. Лебедева от Лихачёва (замеч.: оформление работы, некорректно указана величина оптической толщины, некорректный термин «Северо-Восточное полушарие»), отзыв положительный.

- Института прикладной астрономии РАН от Зав.отделением радиоастрономических наблюдений Ильина Г.Н. (замеч.: не чётко изложен смысл «адаптивности» алгоритма, а также за счёт чего достигнуто снижение ошибки расчёта оптической толщины по сравнению с классическим методом атмосферных разрезов), отзыв положительный.

- Специальной астрофизической обсерватории РАН от д.ф.-м.н., академика РАН, Балеги Ю.Ю. (замеч.: достаточно ли корректно делать прогнозы для перспектив инструментов на Суффе и на Кавказе, построенные на основе измерений только в двух диапазонах?, почему изучены очевидно бесперспективные для радиоастрономических измерений на волнах короче 3 мм площадки в Крыму (Кацивели, Кара-Даг и др.), лежащие на берегу моря, и не оценены перспективы наиболее высоких вершин Крыма (Роман-Кош и соседние вершины выше 1500 м)?), отзыв положительный.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается: назначенные советом официальными оппонентами по диссертации Г.М. Бубнова ученые широко известны своими достижениями в данной отрасли науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации: доктор физико-математических наук, заведующий С. Петербургским филиалом САО РАН, заведующий лабораторией солнечных исследований СПбФ Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. **В.М. Богод** - известный специалист в области наземной радиоастрономии, спектрометрии и радиометрии; кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела спектроскопии

Физического института им. П.Н. Лебедева **С.Б. Розанов** – известен своими работами по дистанционному зондированию атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», широко известен своими исследованиями в области ТГц волн, в том числе связанных с изучением условий распространения этих волн в различных средах. Многочисленные работы её сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что благодаря выполненным соискателем исследованиям:

1. На основе лабораторных радиометрических комплексов МИАП-2 создан мобильный автономный аппаратно-программный комплекс для измерения атмосферного поглощения в диапазоне частот 84...99 и 132...148 ГГц. Два комплекта комплекса, обладая высокой надежностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, в течение 9 лет были использованы для измерения астроклимата с суммарной наработкой свыше 45 000 часов.

2. Разработана, апробирована и внедрена новая методика расчёта микроволнового астроклимата, позволившая уменьшить ошибку расчёта оптической толщины на 20% в 3мм канале и 30% в 2мм канале по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов».

3. По результатам исследований астроклимата 22-х точек на территории Северо-Восточного полушария с использованием модернизированного радиометрического комплекса выявлены три лидирующие площадки по астроклиматическим условиям: плато Суффа, вершина Мус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

4. Сформулированы рекомендации по возможному размещению субТГц радиотелескопов будущей российской программы развития ММ астрономии и по требованиям к точности поверхности главного зеркала строящегося радиотелескопа РТ-70 на плато Суффа. В частности, доказана нецелесообразность доработки 70-метрового телескопа на высоте 2400 м до плановых рабочих длин волн 0,8 мм, и целесообразность дополнения проекта малым субММ зеркалом диаметром 12...20 м, размещаемом на плато Суффа на высоте 3200 м.

5. Модернизирован резонаторный спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: оптимизирован квазиоптический тракт, снижена амплитуда паразитной интерференции на 46%, уменьшено время записи спектра с нескольких часов до нескольких минут. Достигнута чувствительность порядка $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне 45...500 ГГц при контролируемом давлении в диапазоне 10...1000 Торр и температуре в диапазоне $-30...+60^\circ\text{C}$.

6. На модернизированном автором спектрометре получены спектры поглощения волн мм диапазона в атмосфере и впервые экспериментально наблюдался спектр димера воды в миллиметровом диапазоне длин волн при температурах от 7 до 49°C и давлении от 4 до 43 мм.рт.ст.

7. На модернизированном спектрометре проведены измерения потерь на отражение в диапазоне частот 150...250 ГГц и температур 4...300 К от зеркал из

ВТСП, меди, алюминия, бериллия, золота и серебра, позволившие дать рекомендации по оптимальным покрытиям криогенного зеркала телескопа Миллиметрон и исключить из проекта вариант зеркала из ВТСП. Наименьшие потери на отражение получены на образце с золотым гальваническим покрытием и составляют около 0.6×10^{-3} .

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: предложена и апробирована новая методика обработки данных астроклимата, позволяющая снизить на 30% ошибки расчёта оптической толщины, строить статистические диаграммы и анализировать данные. На модернизированном резонаторном спектрометре впервые получены экспериментально и предоставлены разработчикам криогенной антенны Миллиметрон значения коэффициентов отражения излучения СубТГц диапазона при криогенных температурах для образцов металлов и металлических покрытий: медь, алюминий, золото, серебро, а также для коммерческого высокотемпературного сверхпроводника.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: широкий географический охват исследований астроклимата позволил экспериментально выявить особенности микроволнового астроклимата в различных климатических зонах и высотах над уровнем моря, а также сравнить параметры астроклимата в разных местах по данным одного прибора. Опубликован для публичного доступа полный массив полученных за 10 лет экспериментальных данных. Экспериментально получена зависимость интегральной прозрачности атмосферы от высоты места наблюдений. На основе результатов исследований астроклимата на плато Суффа, выработаны рекомендации по корректировке проектного рабочего диапазона телескопа РТ-70 до значений не короче 3 мм и целесообразности установки дополнительного субТГц телескопа (на окна прозрачности атмосферы 3 мм и короче) малого диаметра (12...20 м) в окрестности Суффы на высоте более 3км. На основе результатов измерений потерь на отражение выработаны рекомендации по выбору материала покрытия зеркальной системы и защитных радиационных экранов криогенного космического телескопа Миллиметрон.

Оценка достоверности результатов исследования подтверждается согласием экспериментальных результатов измерений параметров астроклимата с доступными метеорологическими, зондовыми, спутниковыми и радиометрическими данными, когда такое сравнение возможно. Результативность работы методики обработки данных астроклимата критически оценена на экспериментальных данных. Результаты модернизации резонаторного спектрометра подтверждаются высокоточными измерениями спектров атмосферных газов и потерь на отражение, которые валидировались по аналогичным измерениям на других спектрометрах.

Личный вклад соискателя состоит в том, он лично модернизировал радиометрический комплекс МИАП-2 для длительных автономных измерений астроклимата; занимался обработкой данных астроклимата, полученных на приборах МИАП-2, а также разработал и протестировал алгоритм обработки данных астроклимата; занимался организацией экспедиций по исследованию астроклимата, в том числе в рамках своих проектов РФФИ и IEEE; всего успешно провёл 11 экспедиций, в том числе 7 в роли руководителя; выполнил работы по

модернизации спектрометра мм и субмм диапазонов в части обеспечения термостабилизации рабочего объема и контроля температуры, а также электродинамической оптимизации квазиоптического тракта.

В ходе защиты диссертации членами диссертационного совета были заданы вопросы о новизне выполненной работы, о её ценности для практических применений, в том числе для задач астрономии, о методах проведения измерений, о практической новизне этих методов, о методах верификации сделанных измерений по уже известным данным, о пригодности проведенных измерений для решения задач беспроводной связи в миллиметровом диапазоне длин волн.

Соискатель Бубнов Г.М. дал исчерпывающие ответы на вопросы и замечания оппонентов и ведущей организации. Согласился с замечаниями, касающимися оформления текста диссертации и автореферата.

В рамках дискуссии члены диссертационного совета отметили практическую актуальность и высокую научную ценность результатов работы, выделили недочеты, связанные с недостаточно подробным обзором предшествующих результатов.

Диссертационная работа Бубнова Г.М. является законченной научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 824, предъявляемым к диссертациям на соискании ученой степени кандидата наук.

На заседании 27 мая 2022 г. диссертационный совет за создание новых научных и практических методов получения данных о поглощении волн миллиметрового диапазона в атмосфере Земли и материалах криогенных рефлекторов принял решение присудить Бубнову Г.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 17 человек, из которых 9 докторов по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН

«27» мая 2022 г.



Черепенин В.А.

Кузьмин Л.В.