



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Университет ИТМО

д.т.н. Никифоров Владимир Олегович

«11» мая 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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»

Цель работы состояла в получении детальной информации о поглощении волн СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли путём прямых измерений поглощения в полевых и лабораторных условиях для практических целей радиоастрономии, телекоммуникации и спектроскопии. Достижение поставленной цели способствует развитию современной радиоастрономии – как наземной, так и космического базирования, а также развитию перспективных телекоммуникаций в СубТГц диапазоне и других прикладных направлений. Для реализации поставленной цели соискатель ставит следующие **задачи**:

1. Развитие радиометрических методов получения и обработки данных астроклимата и их реализация на базе радиометрических комплексов МИАП-2, с учётом физических свойств атмосферы, параметров аппаратуры и особенностей метода «атмосферных разрезов».

2. Модернизация радиометрических комплексов МИАП-2 с целью расширения их функциональных возможностей и улучшения рабочих параметров. Создание аппаратно-программного комплекса системы удалённого доступа и адаптация радиометрического комплекса МИАП-2 к длительным автономным полевым наблюдениям.
3. Модернизация лабораторного резонаторного спектрометра для обеспечения проведения высокоточных исследований спектральных характеристик атмосферных газов в широком диапазоне температуры, давления и частот.
4. Полевые исследования временной изменчивости характеристик прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне на различных площадках с целью сравнения их между собой и поиска наилучших астроклиматических условий для радиоастрономических наблюдений.
5. Лабораторные исследования спектра поглощения волн СубТГц диапазона в атмосфере Земли в широком диапазоне температуры и давления.
6. Разработка методов расчёта поглощения в реальной атмосфере по метеопараметрам с использованием спектральных моделей поглощения. Поиск взаимосвязи экспериментальных данных о прозрачности атмосферы и метеопараметров.

Автор выносит на защиту следующие научные положения:

1. Впервые методом прямых радиометрических измерений исследованы параметры прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн на перспективных площадках для строительства радиоастрономической обсерватории СубТГц диапазона и/или наземного терминала дальней космической связи в Восточном полушарии. Показано, что среди исследованных площадок

наилучшими по астроклиматическим условиям являются площадки: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

2. Масштабная модернизация радиометрических комплексов МИАП-2 позволила вести с их помощью длительные исследования астроклимата в труднодоступных местах в режиме удалённого доступа. Созданное оборудование позволило провести надежные измерения астроклимата с суммарной наработкой свыше 45 000 часов.
3. Разработанная методика обработки данных астроклимата позволила снизить ошибку расчёта оптической толщины атмосферы на 30% по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов».
4. Расширение рабочего диапазона температуры в резонаторном спектрометре, а также оптимизация структуры и термостабилизация квазиоптического тракта позволили достичь чувствительности спектрометра порядка $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне 45 – 500 ГГц. Впервые проведённые прямые измерения потерь на отражение от металлов и металлизированных покрытий при криогенных температурах демонстрируют преимущество зеркал, изготовленных из чистых металлов (меди, алюминия, золота или серебра) по сравнению с ВТСП.

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. 43 работы представлено в материалах российских и международных конференций, из них 18 входят в базы цитирования Web of Science и/или Scopus. Получено одно свидетельство на программу для ЭВМ.

Оценка научной и практической значимости полученных результатов

В диссертационной работе Бубновым Г.М. были успешно решены задачи по построению и применению в исследованиях физических свойств атмосферы Земли уникального оборудования, включая автономно

работающие радиометрические комплексы миллиметрового (длина волны 3 мм) и субмиллиметрового (длина волны 2 мм) диапазонов. Кроме того, были улучшены и применены существующие методы лабораторных измерений поглощения атмосферных газов и коэффициента отражения покрытия квазиоптических зеркал. Указанные выше диапазоны являются наиболее востребованными окнами прозрачности атмосферы, пригодными для работы многих существующих и проектируемых наземных средств радиоастрономических наблюдений.

Некоторые предложенные автором технические решения впервые были применены в радиометрах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов и позволили существенно улучшить характеристики по сравнению с известными аналогами. Следует отметить следующие технические решения:

- метод обработки радиометрических данных (обобщение метода «атмосферных разрезов» для пяти углов измерения над горизонтом);
- метод учета формы диаграммы направленности приемного рупора;
- метод определения компромисса между частотой среза волноводного фильтра для отсеки нежелательного спектра в диапазоне 3 мм и чувствительностью радиометра;
- метод снижения нежелательной интерференции внутри квазиоптического измерительного резонатора;
- радиотехнические и электротехнические методы обеспечения радиометров системами всепогодной и автономной работы;
- существенное расширения рабочих диапазонов температур и давлений лабораторного измерительного оборудования позволили получить масштабные по объему и совершенно новые знания о физических свойствах атмосферы в рассматриваемых диапазонах.

Практическая значимость вышеуказанных методов связана с быстрорастущим интересом к свойствам радиоканалов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. В первую очередь речь идет об упомянутых в диссертации задачах расчета и проектирования новых радиотелескопов с

учетом точной информации о состоянии атмосферы. Кроме того, обеспечение высокоскоростной беспроводной связью удаленных пунктов нуждается в получении точной информации об атмосферном затухании. Проведение соответствующих точных измерений в ближайшем будущем станет одним из важнейших шагов при проектировании как наземных радиорелейных линий связи, так и спутниковых систем связи нового поколения (к примеру, связь низкоорбитального спутника и базовой станции в перспективных стандартах спутникового доступа в Интернет).

Кроме того, предложенные и проведенные работы по модернизации оборудования позволили обеспечить его длительную автономную работу в экстремальных климатических условиях рассматриваемых площадок. В результате были получены в ходе длительных (более года) циклов измерений, статистически систематизированы и проанализированы широкие объемы уникальных экспериментальных данных об оптической толщине атмосферы и корреляции астроклимата и локальных метеоусловий. Данные результаты, будут способствовать поиску оптимального местоположения проектируемых радиотелескопов.

Научная значимость определяется следующим. Хотя предложенные технические решения реализованы в работе для диапазонов 3 мм и 2 мм, они актуальны и для улучшения радиометров с целью проведения измерения атмосферного поглощения и в других диапазонах. В первую очередь, предложенные методы и подходы целесообразно развивать в дальнейшем в коммерческих диапазонах радиорелейной связи в различных климатических условиях, а также - для коротковолновой части субТГц диапазона.

Кроме того, полученные в работе результаты измерений астроклимата могут быть непосредственно использованы в ходе совместной работы телескопов, установленных в удаленных точках Земли в составе интерферометра с большой базой, что может способствовать получению и интерпретации новых сведений о Вселенной.

Рекомендации по использованию результатов и выводов.

Результаты работы могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях в области радиоастрономии, систем беспроводной связи, метеорологии и физики атмосферы.

К существующим и перспективным системам, в которых могут применяться результаты работы можно отнести следующие:

- Системы радиорелейной связи диапазонов 60, 80 и 90 ГГц;
- Системы связи 6G (предполагаемые частоты выше 110 ГГц);
- Системы терагерцовой спектроскопии газов;
- Расчет и проектирование зеркальных систем и приемных систем радиотелескопов СВЧ, миллиметрового и субТГц диапазонов (включая РТ-70 Суффа, Миллиметрон);
- Исследования влияния атмосферы на системы высокоточного позиционирования по сигналам GNSS фазовыми методами;
- Исследования медленных и быстрых процессов в атмосфере, а также состояния слоев атмосферы в различных регионах мира.

В вышеперечисленных исследованиях заинтересованы как профильные научно-исследовательские институты, занимающиеся физикой космоса и атмосферы Земли, так и корпорации, занимающиеся разработкой перспективных систем связи.

Оценка работы.

Представленная к защите диссертация Бубнова Г.М. является завершенным самостоятельным научным исследованием, результаты которого имеют важное научное и практическое значение. Диссертация написана понятным научным языком и четко структурирована. Изложение результатов и выводы базируются на приведенных результатах и обоснованы. Основные результаты и выводы диссертации, сформулированные соискателем в виде защищаемых положений, в полной мере опубликованы в авторитетных российских и зарубежных научных изданиях, многократно обсуждались на признанных научных конференциях. Автореферат диссертации в полном

объеме отражает содержание исследования, его результаты и выводы. Тема диссертационной работы соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика» т.к. соответствует направлению паспорта специальности: «5. Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач, а также методах дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы».

Следует особо отметить значительный объем и трудоемкость проделанной экспериментальной работы, комплексность решенных задач, а также – уникальность полученных данных об атмосфере.

Можно отметить следующие замечания:

1. В работе рассматриваются вопросы поглощения атмосферы, в то время как для упомянутых во Введении перспективных систем связи важен также вопрос фазовых задержек сигналов в атмосфере;
2. Измерения отражательной способности покрытий зеркал не соответствуют поставленным задачам;
3. В формуле (2) и последующих выражениях не раскрывается значение переменной « t »;
4. Не обоснован выбор линзовых антенн с коническим облучателем для радиометров;
5. Не описан метод получения кривой Рисунка 2.2 и обозначение на вертикальной оси его графика не соответствует формулам и обозначениям в тексте;
6. Не приведен метод выбора углового диапазона, в пределах которого выбирается 5 углов в обобщенном методе «атмосферных разрезов»;
7. Из теста работы не понятно, можно ли было дополнить приемник с прямым усилением канала 3 мм радиометра МИАП-2 фильтрующим элементом волноводного (квазиоптического) тракта

более высокого порядка, чем выбранный фильтр на отрезке запредельного волновода, также не поясняется, чем был обусловлен выбор именно такого фильтра.

8. На Рисунке 2.26 отсутствуют подписи осей на графике;
9. Предложение дополнить состав инструментов МРАО Суффа малым (12-15 м) зеркалом более высокого качества не подкреплено приведенными в работе расчетами;
10. Обозначения расстояний в Таблице 3.3 не соответствуют обозначениям на рисунке 3.10;
11. Не понятно, почему при доработке лабораторного спектрометра не были рассмотрены широко известные методы коллимации пучка дополнительными линзами, а было принято решение о доработке периметра окон вакуумной камеры с использованием поглотителей;
12. В тексте используются некоторые неподходящие для научного текста выражения, например: «высокорейтинговая статья», «есть все основания полагать», «их характеристики оставляют желать лучшего», «защита от неграмотного специалиста».

Вышеприведенные замечания являются незначительными и не снижают общего высокого уровня оценки диссертационной работы.

Заключение:

Диссертация Бубнова Григория Михайловича представляет собой законченное научное исследование по объему результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов, удовлетворяет п.9. «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013), а ее автор, Бубнов Григорий Михайлович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Доклад по теме диссертационной работы и отзыв заслушаны на научном семинаре физического факультета федерального государственного

