

## О т з ы в

официального оппонента доктора физико-математических наук Сурина Л.А. на диссертационную работу Третьякова Михаила Юрьевича **«Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Изучение спектров атмосферных газов непосредственно связано с вопросами распространения электромагнитного излучения в атмосфере Земли, ее радиационного баланса, и имеет большое прикладное значение. Тематики по исследованию атмосферы входят, в той или иной формулировке, в перечень приоритетных направлений развития науки, а технологии мониторинга и прогнозирования ее состояния относятся к разряду наиболее важных для человечества технологий.

Диссертационная работа М.Ю. Третьякова посвящена спектроскопии атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. На этих частотах атмосфера более прозрачна для излучения, чем в инфракрасной и видимой областях спектра, особенно в условиях тумана, дыма, пыли и других аэрозольных загрязнений. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах проявляются линии вращательных спектров практически всех распространенных в атмосфере молекул, обладающих магнитным или электрическим дипольным моментом. Такие особенности делают этот диапазон крайне привлекательным для количественного молекулярного анализа, лежащего в основе дистанционного зондирования атмосферы Земли и других планет. Неслучайно с каждым годом растет число инструментов наземного, бортового и спутникового базирования, использующих для мониторинга окружающей среды диапазон миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. Поэтому данные по спектральным исследованиям атмосферных газов крайне востребованы, и диссертационная работа М.Ю. Третьякова относится, без сомнения, к **актуальным проблемам** современной физики атмосферы и климатологии.

Важным техническим решением при исследовании спектров атмосферных газов в работах М.Ю. Третьякова стало использование высокодобротного резонатора в качестве поглощающей ячейки. Преимуществом резонаторов является большая эффективная длина взаимодействия электромагнитного излучения с исследуемым газом и, как следствие, очень высокая чувствительность по измерению поглощения. Кроме того, резонаторный спектрометр позволяет исследовать широкие молекулярные линии, что особенно важно для уширенных давлением линий атмосферных газов и нерезонансного поглощения, то есть появляется возможность проводить измерения спектров в условиях реальной атмосферы.

Надо отметить, что спектроскопические данные, используемые для последующих расчетов радиационного баланса атмосферы и решения задач дистанционного зондирования, должны иметь очень высокую точность, так как результатом таких расчетов является интегральное поглощение на длинных трассах с разными условиями распространения излучения. Даже небольшие ошибки в спектроскопических параметрах или неточности моделей приводят к значительным неопределенностям в интерпретации результатов расчетов. И здесь резонаторный спектрометр дает еще одно преимущество для измерения поглощения, поскольку длина взаимодействия излучения с газом может быть выражена в единицах частоты, на которой проводится измерение. В спектрометрах всех других типов длина взаимодействия входит как множитель в измеряемое поглощение, и неопределенность длины приводит к неопределенности в определении коэффициента поглощения.

С учетом достигнутых характеристик резонаторного спектрометра и полученных на нем результатов можно однозначно утверждать, что в диссертационной работе разработано **новое научное направление**: широкодиапазонная микроволновая резонаторная спектроскопия атмосферных газов. Новизна работы М.Ю. Третьякова подтверждается множеством приведенных в ней оригинальных экспериментальных фактов. Это, во-первых, результаты измерений, полученные по сравнению с предыдущими работами с более высокой точностью и в более широких диапазонах экспериментальных условий. Во-вторых, впервые осуществлено прямое экспериментальное подтверждение справедливости теоретических расчетов двух наиболее известных форм широких атмосферных линий, в частности, формы Ван Флека – Вайскопфа для изолированных линий и формы Розенкранца для столкновительно-связанных линий. В-третьих, в форме профиля поглощения 60 ГГц полосы атмосферного кислорода впервые выявлены спектральные проявления эффекта столкновительной связи, которые невозможно описать в рамках приближения первого порядка по давлению. Далее, впервые экспериментально зарегистрированы вращательные спектры димера воды  $(\text{H}_2\text{O})_2$  при типичных для земной атмосферы температурах и подтверждена гипотеза, что именно димерами обусловлена значительная часть квадратичной по влажности составляющей континуального атмосферного поглощения. Это далеко не полный список принципиально новых результатов, представленных в диссертационной работе.

**Практическая значимость** полученных результатов бесспорна, поскольку вопросы распространения излучения в атмосфере неразрывно связаны с развитием радиосвязи, радиолокации, дистанционного зондирования и климатом нашей планеты. Можно отметить, что исследование столкновительной связи линий тонкой структуры атмосферного

кислорода, выполненное с высокой точностью, позволило получить количественные параметры эффекта, используемые в настоящее время в большинстве моделей распространения миллиметрового и субмиллиметрового излучения. Очень ценным для спектроскопических приложений результатом работы является уточнение параметров столкновительного уширения и сдвига диагностических линий водяного пара и кислорода, измеренных при низких давлениях. В области исследования континуума ценность результатов работы для практических приложений состоит в определении наиболее точных и надежных в настоящее время значений эмпирических коэффициентов связанного с влажностью атмосферного континуума в миллиметровом диапазоне длин волн.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Работа (включая приложения) изложена на 268 страницах.

**Введение** представляет мотивацию, как самого исследования, так и выбора спектрального диапазона, и использования метода резонаторной спектроскопии. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, их научная новизна и практическая значимость. Перечислены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** дает краткие сведения о молекулярной спектроскопии газов. Особое внимание уделено основным понятиям, необходимым для моделирования атмосферного поглощения. Рассматриваются резонансные молекулярные линии и нерезонансное поглощение. Разбираются физические механизмы, определяющие ширины и форму профиля линий и приводящие к нерезонансному поглощению. Предложен метод оценки концентрации димеров и тримеров в водяном паре в широком интервале температур и величины бимолекулярного поглощения.

**Вторая глава** посвящена технике резонаторной спектроскопии. Показаны ее преимущества для количественного молекулярного анализа, такие как большая длина поглощения и возможность исследования широких спектральных линий. Обозначены возникающие технические проблемы и показаны пути их решения. Представлен принцип действия созданного автором резонаторного спектрометра, приводятся методики измерения поглощения и разработки по оптимизации основных характеристик спектрометра. В частности, впервые экспериментально продемонстрирована возможность быстрого фазонепрерывного сканирования частоты источника миллиметрового и субмиллиметрового излучения; разработана и экспериментально протестирована методика эффективного накопления сигнала отклика резонатора Фабри-Перо при быстром цифровом сканировании частоты возбуждающего излучения; впервые реализована система ФАПЧ излучения

первичного источника миллиметрового диапазона по компонентам гребенки частот, созданной фемтосекундным лазером; реализована система ФАПЧ ЛОВ, обеспечивающая устойчивую бесподстроечную многочасовую работу резонаторного спектрометра, включающую сканирование частоты зондирующего излучения в широком диапазоне частот. Проводится сравнение основных характеристик созданного спектрометра и лучших среди аналогичных мировых инструментов подобного класса, и демонстрируется его превосходство по основным параметрам.

**Третья глава** представляет результаты исследований атмосферного поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Особое внимание уделено той информации о спектрах атмосферных газов, которую удалось получить с помощью нижегородского резонаторного спектрометра, созданного автором. Эта глава делится на две большие части. В первой представлены новые высокоточные измерения спектральных линий водяного пара и кислорода в широком диапазоне давлений и температур. Осуществлено первое лабораторное измерение параметра сдвига одной из важнейших диагностических атмосферных линий водяного пара вблизи 183 ГГц и первое измерение ее интенсивности с точностью около 1%. Уточнены частоты, коэффициенты уширения и коэффициенты связи первого порядка по давлению для линий тонкой структуры атмосферного кислорода.

Вторая часть третьей главы посвящена исследованию континуального поглощения и экспериментальному анализу причин его возникновения. Получены наиболее точные к настоящему времени коэффициенты линейной и квадратичной по влажности частей эмпирической аппроксимации атмосферного континуума в диапазоне частот от 110 до 170 ГГц при температурах от 261 до 328 К. Впервые экспериментально зарегистрированы вращательные спектры димера воды в условиях близких к атмосферным и получено подтверждение того, что димеры в связанном состоянии присутствуют в атмосфере в количестве, согласующемся со вторым вириальным коэффициентом. Подтверждены выводы предшествующих работ, что именно димерами обусловлено континуальное поглощение миллиметровых волн водяным паром. Результаты М.Ю. Третьякова по исследованию континуума водяного пара и димеров воды были высоко оценены мировым спектроскопическим сообществом и восприняты как важный шаг в понимании роли димеров в поглощении солнечной радиации в атмосфере Земли.

**В Заключении** сформулированы наиболее существенные результаты резонаторной спектроскопии в исследовании поглощения миллиметровых и субмиллиметровых волн земной атмосферой.

Полученные автором результаты будут востребованы при решении научных и практических задач в области теории молекулярных спектров, физики атмосферы, атмосферной спектроскопии и климатологии институтами Российской Академии наук (ИФА, ИСАН, ИОА, ИКИ), учреждениями высшего образования (СПбГУ, МФТИ, МГУ, Томский ГУ), организациями Росгидромета и др. Эти результаты представляют большую ценность для существующих баз данных по параметрам молекулярных спектральных линий, необходимых для расчета возникновения и переноса излучения в атмосфере (например, HITRAN), восполняют многие пробелы в существующей системе знаний и заметно расширяют экспериментальный базис для развития теоретических исследований, что определяет **научную значимость** диссертационной работы.

**Достоверность** представленных в ней экспериментальных результатов определяется хорошо отработанными технологиями проведения измерений, их статистической обеспеченностью, детальным сравнением с литературными данными из других источников.

Текст диссертации логично структурирован и грамотно изложен. Опечатки встречаются (например, «изучения» вместо «излучения» в нескольких местах), но их число крайне незначительно. Оценивая диссертационную работу М.Ю. Третьякова очень положительно, хочу сделать два замечания:

1. Представленный автором резонаторный спектрометр (Глава 2), на котором получены наиболее важные результаты диссертации, использует в качестве источника излучения лампы обратной волны (ЛОВ), с которыми у нижегородского коллектива и соискателя имеется большой опыт работы. В настоящее время, насколько мне известно, производство ЛОВ уже остановлено. Хотелось бы узнать мнение автора о перспективах использования данного спектрометра с альтернативными источниками излучения (например, микроволновые синтезаторы с умножителями частоты) и о том, как это может сказаться на полученных рекордных параметрах инструмента.

2. В Главе 3 показана определяющая роль димеров воды в континуальном поглощении водяного пара. Выполнены также эксперименты по их наблюдению в газовых смесях водяного пара с атмосферным воздухом. В то же время теоретические оценки (Kjaergaard, 2003) указывают на то, что вклад гетеродимеров  $\text{H}_2\text{O-N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O-O}_2$  в атмосферное поглощение сравним с вкладом димеров воды. Автор пишет, что эти гетеродимеры менее изучены, хотя по низкотемпературным спектрам  $\text{H}_2\text{O-N}_2$  в молекулярной струе есть большой экспериментальный материал, как по чисто вращательным переходам (5-50 ГГц), так и туннельно-вращательным (400-600 ГГц) (см., например, Thesis by P.A. Stockman, 1996). Из текста диссертации остается непонятным,

предпринимались ли попытки наблюдать спектры указанных гетеродимеров при условиях близких к атмосферным, и каковы выводы из этих наблюдений, если они были выполнены.

Указанные замечания, или скорее вопросы, ни в коей мере не снижают высокой оценки представленной диссертационной работы М.Ю.Третьякова **«Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн»**. Она представляет собой завершённую научно-квалификационную исследовательскую работу, в которой содержится решение задачи, имеющей большое значение для физики молекулярных спектров, физики атмосферы и климатологии. Исследование выполнено на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы и достоверны.

Автореферат и публикации автора в ведущих зарубежных и отечественных журналах, рекомендованных ВАК РФ, в полной мере отражают основное содержание диссертации. Тема исследования соответствует заявленной **научной специальности 01.04.03 – «Радиофизика»**, по которой она представлена к защите.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертация Третьякова Михаила Юрьевича по своему содержанию, объёму выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов в полной мере соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации N 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Официальный оппонент: Сурин Леонид Аркадьевич,  
доктор физико-математических наук (01.04.05 – «Оптика»),  
ведущий научный сотрудник  
Института спектроскопии РАН  
Почтовый адрес:  
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5  
Тел. раб. +7 495 851-0227  
E-Mail: surin@isan.troitsk.ru

Подпись д.ф.-м.н. Л.А. Сурина заверяю  
Ученый секретарь ИСАН, к.ф.-м.н.  
Е.Б. Перминов

