

ОТЗЫВ

официального оппонента **Троицкого Аркадия Всеволодовича** - доктора физико-математических наук, заведующего отделом «Распространения радиоволн и дистанционного зондирования» Научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского государственного университета им.Н.И. Лобачевского на диссертацию М.Ю. Третьякова «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».

Диссертационная работа М.Ю.Третьякова посвящена:

- развитию и разработке методов и аппаратуры широкодиапазонной микроволновой резонансной спектроскопии,
- экспериментальным исследованиям спектральных особенностей поглощения атмосферы в диапазоне длин волн 40-500 ГГц,
- построению физических моделей переноса микроволнового излучения в земной атмосфере.

Исследование процессов взаимодействия электромагнитных волн с атмосферой, а именно с её основными поглощающими газами- кислород и водяной пар, является чрезвычайно актуальной и сложной проблемой науки о Земле и жизнедеятельности человека.

Основным естественным фактором, воздействующим на климат Земли, является Солнце и его активность. Основное воздействие на земную атмосферу и поверхность осуществляется через интегральный поток электромагнитного излучения Солнца и его спектральные составляющие от ультрафиолетового до микроволнового излучения. Основным атмосферным объектом, воспринимающим это излучение и взаимодействующим с ним, является водяной пар, который, в основном (~70% при общем содержании менее 0,6%) и определяет перенос солнечного излучения в атмосфере. В конечном счёте водяной пар, наряду с поверхностью, озоном и облаками, определяют погодные и климатические характеристики Земли, такие как температура, влажность, облачность и осадки. Кроме того вопросы переноса микроволнового излучения в атмосфере, решаемым в диссертационной работе, имеют большое прикладное значение в задачах распространения радиоволн и дистанционного зондирования атмосферы. Для создания модели распространения излучения в атмосфере, необходимо знание

характеристик взаимодействия излучения с атмосферными газами в зависимости от частоты, что и является основным содержанием работы. Исходя из выше сказанного, актуальность и практическая значимость работы очевидны и не вызывают никаких сомнений.

Диссертация состоит из введения трех глав, заключения, приложений. Содержит 248 страниц текста (без приложений), включая 81 рисунок, 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 357 работ.

Во введении дается общая характеристика и современное состояние резонаторной спектроскопии, формулируются цели и задачи работы, обосновываются методы исследования.

В первой главе сформулированы основные физические принципы моделирования атмосферного поглощения в областях спектральных линий атмосферных газов:

- * форма спектральных линий в условиях естественного, радиационного, доплеровского уширения и интерференции линий
- * зависимость спектральных линий от температуры
- * особенности формы спектральных линий при атмосферном давлении и особенности широкодиапазонного моделирования спектров.

Подробно рассмотрено нерезонансное или континуальное поглощение. Природа этого поглощения до недавнего времени оставалась необъяснимой и только результаты, выполненные в данной работе поставили окончательную точку в продолжавшихся десятилетия научных спорах.

Вторая глава посвящена созданию резонаторного спектрометра и разработке методик его применения для широкодиапазонных спектроскопических исследований атмосферных газов. Излагаются общие принципы построения резонаторного спектрометра и его особенности. Подробно разбираются составляющие потерь мощности излучения, решаются проблемы их минимизации. Предложены и разработаны методы регистрации широкодиапазонных спектров. Особо необходимо отметить, что в работе впервые предложен и реализован режим быстрого цифрового сканирования частоты источника микроволнового излучения, стабилизируемого системой фазовой автоподстройки частоты. Перестройка частоты с сохранением фазы колебаний осуществляется с помощью радиочастотного синтезатора прямого цифрового синтеза на основе высокоскоростного процессора. Это позволило (наряду с другими мерами) достигнуть рекордной чувствительности резонаторного спектрометра по коэффициенту поглощения $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, что на порядок превосходит лучшие мировые аналоги (спектрометр университета Огайо, США, Института телекоммуникаций, Боулдер, США,

Университета г. Лилль, Франция). Впервые предложен и реализован прецизионный метод исключения влияния адсорбции молекул воды на результаты измерений поглощения.

Суть метода заключается в использовании для измерений модуля из двух максимально идентичных резонаторов, отличающихся по длине в два раза, и в предположении, что адсорбция и вызванные ей потери одинаковы в обоих резонаторах. Реализация этих методов наряду с применением широкодиапазонных ламп обратной волны в качестве источника излучения позволило непрерывно измерять молекулярные спектры при атмосферных давлениях в микроволновом диапазоне от 40 до 500 ГГц.

В третьей главе приводятся пионерские результаты экспериментальных исследований спектральных особенностей поглощения атмосферы в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. В первую очередь к ним следует отнести:

* С помощью высокоточных широкодиапазонных измерений линий поглощения воды на 183, 325, 380 и 448 ГГц впервые установлено экспериментальное подтверждение справедливости формы изолированной атмосферной линии Ван Флека - Вайскопфа (ударное приближение), а по измерениям в линиях поглощения кислорода около 60 и 118 ГГц формы линии Розенкранца, в которой учитывается интерференция линий тонкой структуры атмосферного кислорода (столкновительно - связанные линии). Выполненные исследования столкновительной связи таких линий позволили получить количественные параметры эффекта и создать соответствующую модель атмосферного поглощения.

* Уточнены параметры уширения и сдвига частоты спектральной линии, измеренные при низких давлениях. Измеренные значения сдвига для линии воды 183 ГГц оказались столь значительными, что потребовалось введение его в модель переноса микроволнового излучения в атмосфере. В результате широкодиапазонных исследований спектров основных атмосферных газов получены наиболее точные, на сегодняшний день, значения спектральных констант.

* Впервые обнаружены вращательные переходы димеров воды $(\text{H}_2\text{O})_2$ - четыре линии в диапазоне 105-150 ГГц и шесть линий в диапазоне 190-260 ГГц и подтверждена гипотеза димерной природы континуального атмосферного поглощения, а именно её квадратичной по влажности составляющей.

Результаты диссертационной работы М.Ю. Третьякова являются результатами мирового уровня, а обнаружение микроволнового спектра димеров воды смело можно отнести к разряду открытий.

Значительная часть диссертационной работы посвящена сравнению результатов, полученных автором с результатами ведущих мировых исследователей в этой области.

Выполненные сравнения свидетельствуют о хорошей сходимости результатов измерений различными методами, что еще раз убеждает в достоверности полученных в диссертации результатов.

По работе имеются следующие замечания.

1. В работе отсутствует рассмотрение точностных характеристик метода подавления влияния адсорбции воды с помощью двух открытых резонаторов Фабри – Перо.
2. Из работы не ясна степень влияния «эффекта ветра» (учет влияния функции распределения молекул по скоростям) на форму диагностических атмосферных спектральных линий, что важно для задач дистанционного зондирования и распространения радиоволн.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация написана хорошим физическим языком. Хорошо оформлена. Основные результаты опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях, неоднократно обсуждались на Всесоюзных и международных конференциях и многие из них стали классическими.

В целом диссертационная работа М.Ю. Третьякова представляет законченное научное исследование, а совокупность сформулированных и обоснованных в диссертации положений как новое научное направление - широкодиапазонная резонаторная спектроскопия атмосферных газов.

Таким образом, диссертационная работа М.Ю. Третьякова выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявленным к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой степени.

Содержание автореферата и опубликованных М.Ю. Третьяковым работ полностью соответствует тексту диссертации.

Официальный оппонент
Троицкий Аркадий Всеволодович
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом
ведущий научный сотрудник

Научно-исследовательский радиопизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а
Тел.: 8 (831) 416-95-02
E-mail: avtroitsky@yandex.ru



Подпись Троицкого А.В. заверяю