

**"УТВЕРЖДАЮ"**

**Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт  
физики атмосферы им. А.М.  
Обухова РАН, академик  
И.И. Мохов**



2017 г.

### **Официальный отзыв ведущей организации**

на диссертационную работу Михаила Юрьевича 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

Диссертация М.Ю. Третьякова - результат тщательной и высокопрофессиональной работы - подводит промежуточный итог общепризнанным экспериментальным достижениям автора и возглавляемого им коллектива сотрудников ИПФ РАН. Работа М.Ю. Третьякова, выполненная в лучших традициях нижегородской радиофизической школы, в очередной раз свидетельствует о выдающемся вкладе ее воспитанников в мировую науку. Среди отличительных черт, характеризующих диссертацию М.Ю. Третьякова, можно отметить следующие: 1) оригинальность и глубину изложения ее вводной части; 2) детальность обзора современных высокочувствительных экспериментальных методов, используемых для получения вращательных спектров молекул; 3) последовательность описания и изложения результатов целого ряда пионерских экспериментов, выполненных под руководством и при активном участии автора. Исследования молекулярных спектров в микроволновом (терагерцовом, дальнем ИК) диапазоне представляют большой интерес для атмосферных приложений, поскольку во многих случаях именно в этой спектральной области тепловое излучение нагретых поверхностей небесных тел имеет максимальную интенсивность. Детальный учет поглощения этого излучения в климатических моделях - одно из неперемных условий повышения их точности. Кроме того, исследуемая в

диссертации спектральная область активно используется в целях дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности, для телекоммуникации и для многих других приложений, связанных с распространением излучения в атмосфере. Вместе с тем, актуальность данной работы не исчерпывается исключительно потребностями прикладной науки. Разработка и применение высокоточных резонаторных спектрометров позволили получить уникальные результаты в области фундаментальной науки, в частности, впервые зарегистрировать спектральные "отпечатки пальцев" димеров воды при атмосферных условиях. Этот результат получил широкое признание мирового сообщества, поскольку проблема выявления роли димеров в континуальном поглощении водяного пара остается одной из сложнейших в молекулярной спектроскопии на протяжении многих десятилетий.

Диссертация состоит из Введения, трех основных глав, Заключения, Приложений и списка литературы. Во Введении охарактеризована постановка проблем, рассматриваемых в работе, дано обоснование выбора используемой аппаратуры и дан краткий обзор состояния применяемых в мире резонаторных методов молекулярной спектроскопии. Первая глава посвящена детальному рассмотрению основных положений молекулярной спектроскопии газовых сред, необходимых для анализа получаемых экспериментальных результатов и для построения моделей атмосферного поглощения. Особое внимание уделено проблеме спектроскопических проявлений межмолекулярных взаимодействий в газах, поскольку именно эти взаимодействия ответственны за так называемую континуальную часть ослабления радиации в атмосфере. Моделирование континуального поглощения, в частности, континуума водяного пара - одна из наиболее сложных и актуальных проблем атмосферной спектроскопии. Следует отметить несомненные педагогические достоинства данной и последующих глав диссертации. Не случайно основной материал, представленный в диссертации, позволил М.Ю. Третьякову опубликовать одноименную монографию, чрезвычайно полезную для специалистов, преподавателей и студентов. Во второй главе диссертации изложены принципы работы и описаны основные элементы построения резонаторных спектрометров. Подробно рассмотрен пример нижегородского спектрометра, приведены основные его параметры и возможности, в том числе обсуждаются возможности его совершенствования. Приведено сравнение нижегородского спектрометра с другими известными установками, созданными в ведущих мировых лабораториях. Наконец, в третьей главе приведены результаты, полученные для водяного пара и кислорода с помощью резонаторного и РАД спектрометров. Часть описываемых экспериментов была посвящена изучению профиля и

интенсивностей изолированных вращательных линий. При этом для целого ряда линий были уточнены величины их интенсивностей, коэффициентов уширения и сдвига, параметров столкновительной связи, а для некоторых линий параметры уширения были получены впервые. Нельзя не отметить, что в этой части работы, впрочем, как и в других разделах диссертации, М. Ю. Третьяков не только описывает подробно результаты, в получении которых он сам принимал участие, но критически оценивает собственные результаты в ряду аналогичных мировых исследований. Исследование резонансных линий водяного пара логичным образом привело М.Ю. Третьякова к необходимости обратить пристальное внимание на проблему континуального поглощения. В диссертации приведен подробный обзор состояния исследований в этой области. На протяжении многих десятилетий в литературе продолжается дискуссия о природе континуального поглощения водяного пара, имеющего, в частности, огромное значение для теплового баланса в атмосфере Земли. В качестве одной из наиболее популярных гипотез происхождения континуума, начиная с пионерских работ нижегородской школы (Викторова и Жевакин, 1966), рассматривается поглощение слабосвязанных димеров воды. Высокая эрудиция, мастерство проведения эксперимента и выдающиеся характеристики нижегородского спектрометра позволили М.Ю. Третьякову и его сотрудникам впервые в мире идентифицировать «отпечатки пальцев» димеров воды в водяном паре, находящемся в термодинамически равновесном состоянии при близких к атмосферным условиям. Этот выдающийся результат получил высокую оценку мирового сообщества.

Диссертация М.Ю. Третьякова написана хорошим и грамотным языком, все части работы отличают глубокое понимание физики явлений и попытки как можно более объективного рассмотрения сложных явлений, не поддающихся пока однозначной интерпретации. В работе имеются незначительные упущения, связанные с неудачными формулировками, сомнительными утверждениями или с библиографическими погрешностями. Приведем лишь некоторые примеры.

1. На стр. 47 утверждается, что «...время жизни {метастабильных состояний димера} может быть рассчитано из вероятности туннелирования через потенциальный барьер...». В действительности квантовое туннелирование определяет время жизни метастабильных состояний в случае так называемых shape-резонансов, тогда как для многоатомных димеров, в том числе для димеров воды, наиболее существенны резонансы Фешбаха, время жизни которых определяется динамикой межмодового распределения энергии. Время жизни таких резонансных состояний может быть оценено, например, путем классических траекторных расчетов.

2. На стр. 53 говорится о том, что «Анализ возможных колебаний в димере воды был впервые проделан в работе [Reimer, 1984]». На самом деле такой анализ проводился разными авторами задолго до появления указанной публикации (см., например, ссылки в обзоре: А.А. Вигасин, Журнал структурной химии, 1983, Т.24, N.1, с. 116).
3. Значительная часть умозаключений, относящихся к установлению природы континуального поглощения в микроволновой области, сделана в предположении о том, что моделирование низкочастотного спектра димера воды, представленное в работе [Scribano, 2007] заслуживает полного доверия. Не подвергая сомнению очевидные достоинства цитируемой выше работы, нельзя не отметить, что количественная достоверность полученных Scribano & Leforestier результатов вызывает серьезные сомнения. Расчеты, проведенные С. Leforestier, действительно, показали наличие в спектре димера квазиэквидистантной последовательности пиков, которая была впервые зарегистрирована в работах М.Ю. Третьяковым и соавт. Это не может, однако, служить доказательством достоверности неэмпирического расчета С. Leforestier формы полосы поглощения димеров и ее интенсивности. В связи с этим высказанные в диссертации М.Ю. Третьякова утверждения о невозможности объяснения наблюдаемого поглощения с помощью димерной гипотезы выглядят, на наш взгляд, недостаточно убедительно.
4. На стр. 55 утверждается, что в работе [Scribano, 2007] «...явным образом учитывались все возможные вращательно-колебательно-инверсионные переходы димера вплоть до порога диссоциации водородной связи». В действительности в этой работе была выполнена экстраполяция уровней энергии, рассчитанных вблизи минимума потенциала, вплоть до области диссоциации. Вопрос о точности и достоверности такой экстраполяции остается открытым.
5. Говоря об оценках содержания гетерокомплексов при атмосферных условиях, М.Ю. Третьяков полагает (стр. 59), что правомерность применения статистической термодинамики в данном случае может быть поставлена под сомнение. Это утверждение основано на недоразумении, связанном, возможно, с неправомерностью использования в подобных расчетах приближения ЖРГО. Разумеется, метод статистической термодинамики может и должен применяться в данном случае с учетом полной потенциальной поверхности взаимодействующих молекул.
6. На стр. 60 утверждается, что «Расчет спектров димеров в метастабильных состояниях в настоящее время не представляется возможным». В действительности

такой расчет возможен, например, методом классических траекторий с использованием Фурье-преобразования автокорреляционной функции дипольного момента.

Данная работа, выполненная на самом передовом научном уровне, предоставляет широкое поле для интересной научной дискуссии, стимулирует развитие передовых исследований, выдвижение новых идей и гипотез. Высказанные выше несущественные замечания несколько не снижают ее общей высокой оценки. Диссертация М.Ю. Третьякова представляет собой систематическое законченное научное исследование в области радиофизики, молекулярной физики и спектроскопии. Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертации. Все основные результаты работы опубликованы в отечественной и в зарубежной печати, прошли апробацию на научных форумах самого высокого уровня.

Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяет квалифицировать её как значительное достижение в развитии высокоточной спектроскопии атмосферных молекул. Основные результаты работы представляют большой интерес для фундаментальной науки и приложений.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в ИОА СО РАН, ИФА им. А.М. Обухова РАН, ИКИ РАН, НПО «Тайфун», Институте спектроскопии РАН, РНЦ «Курчатовский институт», НИИФ при СПбГУ, Институте прикладной физики РАН и других научных организациях, в которых, в частности, проводятся исследования, связанные с дистанционным зондированием, переносом радиации и климатическим моделированием для условий атмосфер Земли и планет.

Диссертация М.Ю. Третьякова является законченным исследованием и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к докторским диссертациям. Автор диссертации, М.Ю. Третьяков, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Ведущий научный сотрудник ИФА им. А.М. Обухова РАН,  
доктор физико-математических наук



А.А. Вигасин