

На правах рукописи



КОРОЛЕВА Александра Олеговна

**СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДЯНОГО ПАРА
В ДАЛЬНЕМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНАХ
ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ:
ЛИНИИ И КОНТИНУУМ**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Третьяков Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Пташник Игорь Васильевич, доктор физико-математических наук, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск)

Коузов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится «10» июня 2024 года в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru

Автореферат разослан 25 апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Водяной пар поглощает излучение на частотах от микроволнового диапазона до ультрафиолетового и выше и является основным парниковым газом в атмосфере Земли. Он отвечает за 60% парникового эффекта при ясном небе в инфракрасном (ИК) диапазоне при длинах волн > 4 мкм, а также за примерно 60% от общего атмосферного поглощения на коротких длинах волн (< 4 мкм) [1].

В работе рассматриваются дальний и ближний ИК-диапазоны длин волн. Они оба важны для атмосферных приложений, так как содержат полосы поглощения многих астрофизических, органических и атмосферных молекул, таких как H_2O , O_2 , NO_2 , O_3 , NH_3 , CO_2 . Особенное значение для атмосферных приложений дальнего ИК-диапазона обусловлено тем, максимум исходящего от Земли теплового излучения приходится на ТГц диапазон (0.1–10 ТГц или 3–300 cm^{-1}). Но экспериментальные исследования поглощения водяного пара на этих частотах скудны из-за отсутствия широкодиапазонных источников излучения с достаточной спектральной яркостью и приемников с достаточной чувствительностью (именно поэтому этот диапазон называется «терагерцовым провалом» [2]). Его важность для радиационного баланса Земли является основной мотивацией миссии Европейского космического агентства по мониторингу исходящего излучения в дальнем ИК-диапазоне (FORUM) [4]. Одной из определенных целей этой миссии является «восполнение пробела в наблюдениях в дальнем ИК-диапазоне (от 100 до 667 cm^{-1} или 3–20 ТГц), который ранее никогда полностью не измерялся из космоса».

Что касается ближнего ИК-диапазона, на близких частотах находится максимум поступающего в атмосферу солнечного излучения. Диапазон частот, рассматриваемый в этой работе, соответствует окну прозрачности 1,1–1,4 мкм, которое используется для мониторинга парниковых газов [5].

Поглощение водяного пара состоит из (а) колебательно-вращательных линий мономера воды (резонансные линии), составляющие колебательно-вращательные полосы, обусловленные переходом молекулы на более высокие энергетические уровни, и (б) нерезонансного поглощения (континуума), соответствующего разнице между измеренным («истинным») поглощением и вкладом в него резонансных линий, рассчитанным с использованием заданного списка и модели формы линии (рис. 1). Величина континуума относительно невелика по сравнению с поглощением вблизи центров интенсивных резонансных линий, но в микроокнах прозрачности атмосферы его вклад в поглощение водяного пара становится значительным, а иногда и доминирующим (рис. 1).

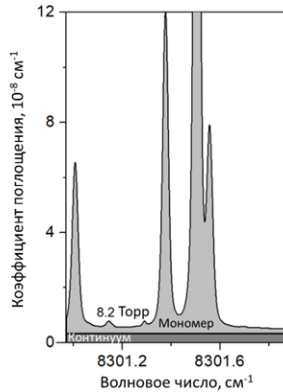


Рис. 1. Участок спектра поглощения водяного пара в ближнем ИК-диапазоне при комнатной температуре и давлении 8,2 Торр. Черная линия – измеряемое поглощение. Светло-серая область соответствует вкладу резонансных линий водяного пара, темно-серая – континуум

Во многих частотных диапазонах связанное с влажностью континуальное поглощение сопоставимо с вкладом в атмосферное поглощение других атмосферных молекул или превышает его. Что касается важности континуума для атмосферных исследований, континуум водяного пара сильно влияет на радиационный баланс Земли и на радиационный форсинг углекислого газа [6]. Кроме того, континуум оказывает влияние на распространение лазерного излучения в атмосфере и может препятствовать дистанционному обнаружению атмосферных газов, аэрозолей и облаков оптическими методами [7]. Это подтверждает востребованность результатов исследования для атмосферных приложений.

Степень разработанности темы

Информация о параметрах резонансных линий, предоставляемая в используемых для атмосферных приложений базах данных, таких как HITRAN [8], представляет собой компиляцию теоретических и экспериментальных результатов. Важность водяного пара для атмосферных приложений подталкивает развитие теоретических методов для уточнения параметров его спектра [9–13]. Преимуществом теоретических расчетов перед экспериментальными исследованиями является полнота охвата спектра и возможность получения параметров даже самых слабых линий изотопологов водяного пара, которые не могут быть измерены экспериментально [14]. Тем не менее, экспериментально определяемые центральные частоты резонансных линий остаются значительно более точными [15], из-за чего современные теоретические расчеты проводятся с опорой на экспериментальные данные [14, 16, 17].

Что касается интенсивностей линий H_2O , хотя на сегодняшний день заявленная точность *ab-initio* расчетов составляет около 1% [18], разница между различными расчетами может превышать 1% даже для самых сильных линий в пределах основного колебательного состояния [19]. Для возбужденных же (особенно изгибных) колебательных состояний отклонение расчетных интенсивностей линий может превышать 100% [A9]. Возможная неверная идентификация спектральных линий также приводит к ошибкам в частотах линий и их интенсивностях. Эти факты указывают на необходимость проверки и, при необходимости, уточнения информации о параметрах резонансных линий мономера воды.

Что касается континуального поглощения, дискуссия о его природе [7] продолжается до сих пор. Механизмы, отвечающие за формирование континуума, известны: это поглощение дальних крылья интенсивных резонансных линий [20] и пар молекул (бимолекулярных состояний) [21, 22]. Однако расчеты величины континуума водяного пара представляются крайне сложными как из-за трудностей моделирования парных взаимодействий полярных несимметричных молекул воды, так и из-за проблемы моделирования поведения дальних крыльев резонансных линий [23], поэтому их вклады в континуальное поглощение до сих пор не разделены, и физически обоснованной модели континуума не существует.

Для атмосферных приложений используется полуэмпирическая модель континуума MT_CKD [24]: только она позволяет рассчитать континуум во всем значимом диапазоне колебательно-вращательного спектра водяного пара ($10\text{--}10000\text{ см}^{-1}$). Эта модель содержит большое количество подгоночных параметров и обновляется при появлении новых экспериментальных данных, при этом расчет с помощью разных версий модели может отличаться на десятки процентов [25]. Несмотря на богатую историю экспериментального изучения континуума водяного пара [7, 26, 27], в обоих рассматриваемых в этой работе спектральных диапазонах были области, в которых он ранее не был измерен.

Цели и задачи исследования

Для расчета поглощения водяного пара с субпроцентной точностью, требуемой сегодня для атмосферных приложений в широком диапазоне частот, давлений и температур, требуется физически обоснованная модель полного поглощения. Цель этой работы – сделать еще один шаг к построению такой модели, которая корректно учитывает все механизмы поглощения излучения водяным паром. Главной задачей для достижения цели работы является получение высокоточных экспериментальных данных, характеризующих обе составляющие полного поглощения (резонансные линии и континуум), в двух важных для атмосферных приложений диапазонах частот, в частности:

1. Определение центральных частот и интенсивностей резонансных линий водяного пара по спектрам поглощения водяного пара, записанных с высоким разрешением в дальнем и ближнем ИК-диапазоне. Уточнение системы энергетических уровней H_2O на основе полученных центральных частот.
2. Определение величины связанного с влажностью атмосферного континуума в не измерявшихся ранее спектральных участках дальнего и ближнего ИК-диапазона.
3. Сравнение полученных характеристик атмосферного поглощения с используемыми для атмосферных приложений данными [8, 25] для их валидации и уточнения.
4. Анализ вклада в континуум его составляющих для построения физически обоснованной поделки поглощения водяного пара

Научная новизна результатов

Высокая чувствительность используемых в исследовании спектрометров позволила впервые измерить параметры около 2000 линий молекулы воды в двух спектральных диапазонах. Это привело к уточнению структуры энергетических уровней. Также в данной работе представлено первое измерение связанного с влажностью континуума при комнатной температуре в диапазонах 200–330 и 8300–8500 см^{-1} . Полученные данные о континуальном поглощении в дальнем ИК-диапазоне совместно с предшествующими [28] и последующими измерениями [29] позволяют построить всё ещё полуэмпирическую модель континуума водяного пара, но явным образом учитывающую все механизмы его формирования. В ближнем ИК-диапазоне показан вклад в наблюдаемый континуум поглощения димера воды.

Научная и практическая значимость результатов

Полученные данные о параметрах резонансных линий водяного пара позволили выявить значительное число ошибок в широко используемой для атмосферных приложений базе данных HITRAN [8]. Кроме того, наблюдаемые в дальнем ИК-диапазоне частоты линии относятся к основному или первому возбуждённому колебательному состоянию, их энергетические уровни являются нижними энергетическими состояниями для множества более высокочастотных линий, поэтому результаты работы повлияли на точность, с которой известны частоты линий водяного пара, далеко за пределами рассматриваемых в работе частотных диапазонов.

Результаты измерений континуума были использованы для уточнения (в дальнем ИК-диапазоне) и валидации (в ближнем ИК-диапазоне) модели MT_CKD [24], не имеющей аналогов и поэтому широко используемой для приложений.

Методология и методы исследования

Экспериментальные данные получены с использованием техники фурье-спектроскопии в дальнем ИК-диапазоне и резонаторной спектроскопии в ближнем ИК. Высокая чувствительность обоих спектрометров дала возможность определить и слабые резонансные линии, и континуальное поглощение. В дальнем ИК-диапазоне использование синхротронного излучения позволило зарегистрировать спектры поглощения водяного пара в области «терагерцового провала». Запись спектров для определения параметров линий в ближнем ИК впервые выполнена с использованием синтезатора частоты оптического излучения на основе лазерной гребенки. Спектры регистрировались при нескольких давлениях для последующей проверки качества данных и определения параметров спектра поглощения водяного пара. Для анализа данных использовались общепринятые модели профиля резонансной линии и параметры из базы данных HITRAN.

Положения, выносимые на защиту

- Полученные с помощью анализа спектров поглощения водяного пара в диапазонах частот $50\text{--}720\text{ см}^{-1}$ и $8040\text{--}8620\text{ см}^{-1}$ центральные частоты и интенсивности линий молекулы воды дополняют и исправляют информацию из базы данных HITRAN и списка W2020.
- Новые данные о связанном с влажностью атмосферном континууме повышают достоверность информации, извлекаемой при дистанционном зондировании атмосферы, благодаря уточнению модели MT_CKD в дальнем ИК-диапазоне ($15\text{--}500\text{ см}^{-1}$) и подтверждению результатов моделирования с ее использованием в ближнем ИК ($8100\text{--}8620\text{ см}^{-1}$).
- Димеры воды вносят вклад в атмосферное поглощение во всем важном для радиационного баланса Земли спектральном диапазоне.
- Неточность моделирования резонансного спектра водяного пара представляет собой основной источник погрешности определения эмпирических коэффициентов континуума, не отражающийся на практической применимости результатов, но приводящий к негладкой частотной зависимости континуума и сказывающийся на точности интерпретации его природы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность работы подтверждается надежностью выбранного метода исследования, апробированного в предшествующих работах нескольких научных коллективов, занимающихся решением схожих проблем, а также согласием с предшествующими теоретическими и экспериментальными результатами, полученными с использованием методов, отличных от примененных в данной работе (при их наличии).

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и научных школах:

- XX–XXIV, XXVI и XXII научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, 2016–2020, 2022, 2023 г.
- VII и IX семинар «Современное состояние исследований столкновительно-индуцированного и континуального поглощения атмосферных молекул» Москва, ИФА РАН им. Обухова, 2017 и 2019 г.
- XXIII и XIX Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 2018 и 2019 г.
- The 25th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy, Helsinki, Finland, 2017 г.
- The 25th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Bilbao, Spain, 2018 г.
- XIX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Nizhny Novgorod, Russia, 2019.
- 27th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS Cologne 2021), Köln, Germany, 2021 г.
- The International Summer School SPECATMOS on the «Spectroscopy and Atmosphere: Measurements and Modelling», Fréjus, France, 2022 г.
- 75th International Symposium on Molecular Spectroscopy, Urbana-Champaign, IL, USA, 2022 г.
- The 26th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Prague, Czech Republic, 2022 г.
- XX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Irkutsk, Russia, 2023 г.
- 28th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS Cologne 2023), Dijon, France, 2023 г.

Результаты работы обсуждались на научных семинарах в ИПФ РАН. Они отмечены дипломами первой и третьей степени на конкурсах молодых ученых ИПФ РАН в 2021 и 2023 гг., поощрительными дипломами Нижегородских сессий молодых ученых, призом за лучший студенческий доклад на XXI научной конференции по радиофизике и XX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy. Материалы диссертации были опубликованы в международных рецензируемых журналах: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* и *Journal of Molecular Spectroscopy*. Всего по теме диссертации опубликовано 9 статей и 28 тезисов российских и международных конференций.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертации получены при непосредственном участии диссертанта совместно с научным руководителем и соавторами. В каждой из работ автор внес определяющий вклад в подготовки и проведении измерений и/или при обработке экспериментальных данных и анализе результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 136 страниц и включает 68 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 192 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, приводится степень разработанности темы исследования, формулируются его цели и задачи, кратко излагаются методы проведенных исследований, объясняются научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы, указываются методы исследования, дается информация о структуре и объеме диссертации, формулируются положения, выносимые на защиту. Также там указаны данные об апробации работы, степени достоверности полученных результатов и личном вкладе автора в каждую из опубликованных по теме диссертации работ.

Первая глава содержит описание методов моделирования полного поглощения и принципов работы спектрометров, которые необходимы для понимания всех представляемых результатов работы. В **Разделе 1.1** рассматриваются два наиболее распространенных способа описания полного поглощения (как сумма моно- и бимолекулярного поглощения и как сумма резонансных линий и континуума) [27]. Первый способ более физически обоснованный, но для его практического применения необходимо значительное продвижение в теоретических расчетах составляющих поглощения. Вторым является полуэмпирическим, но именно он используется на практике. Для создания физически обоснованной модели полного поглощения природа континуума должна стать полностью ясной, а это требует установления однозначной взаимосвязи между этими двумя способами моделирования поглощения.

Также в Разделе 1.1 Вводится используемая в работе терминология, приводятся профили резонансных линий, использованные впоследствии для анализа данных в обоих частотных диапазонах, рассматривается подход к вычислению вклада в наблюдаемое поглощение крыльев резонансных линий. Объясняются механизмы появления бимолекулярного поглощения и его спектральные особенности. Эти основы спектроскопии конкретизируются

применительно к водяному пару. Приводится обзор известных из литературы экспериментальных исследований связанного с влажностью атмосферного континуума, а также информация о развитии его модели MT_CKD [24, 25]. Уделено внимание атмосферному континууму, не связанному с влажностью («сухому» континууму), учет которого бывает необходим при анализе данных о поглощении влажного воздуха. Кроме того, из-за меньшего количества физических механизмов, дающих заметный вклад в сухой континуум, на его примере проще проиллюстрировать важность физически корректного разделения составляющих полного поглощения для создания его физически обоснованной модели (на примере водяного пара эта мысль получает развитие в конце третьей главы). Основные результаты раздела опубликованы в [A1].

В **Разделе 1.2** обосновывается выбор используемой в работе техники эксперимента (фурье- и резонаторная спектроскопия). В ней приведены принципы работы фурье- и CRDS спектрометров, рассмотрены особенности и характеристики каждого из используемых приборов и представлены методики, примененные для измерения параметров резонансных линий воды и континуального поглощения. В случае фурье-спектрометра особое внимание уделяется аппаратной функции прибора, учет которой критичен при определении интенсивностей резонансных линий, и стабильности базовой линии, необходимой для получения корректной величины континуального поглощения. Детальные описания техники эксперимента представлены в работах [A2, A3, A6] для фурье-спектрометра и дальнего ИК диапазона и в [A7, A8, A9] для CRDS спектрометра с уточнениями ее модификаций, проведенных перед каждым конкретным исследованием.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию частот и интенсивностей линий H_2O в дальнем и ближнем ИК диапазонах. Эти параметры являются основой для моделирования резонансного спектра и необходимы для определения величины континуума из экспериментальных данных (вместе с другими параметрами профиля линий). Дается оценка точности определяемых параметров, с которыми они на сегодняшний день могут быть рассчитаны теоретически и с какими приводятся в HITRAN [8], и обосновывается необходимость их экспериментального уточнения. В **разделах 2.1 и 2.2** обсуждается выбор условий эксперимента и методики обработки экспериментальных данных в обоих частотных диапазонах (включая проведение калибровки частоты, необходимой для данных, полученных с помощью фурье-спектрометра в дальнем ИК диапазоне). Кроме того, приведены способы идентификации спектральных линий и её статистики для дальнего и ближнего ИК-диапазонов, включающей в себя количество идентифицированных и впервые идентифицированных переходов для каждого изотополога, а также диапазоны их частот и квантовых чисел. Центральные частоты и интенсивности определены примерно для 3000 линий с диапазоном интенсивностей от 10^{-26} до 10^{-19} см/молек в дальнем ИК и 5400 линий с диапазоном интенсивно-

стей от 10^{-22} до 10^{-30} см/молек в ближнем ИК-диапазоне. 450 из этих линий в дальнем ИК-диапазоне и около трети в ближнем ИК измерены впервые. Впервые экспериментально определены энергии 81 колебательно-вращательного уровня H_2^{16}O , H_2^{18}O , H_2^{17}O и HD^{16}O на основе анализа спектров ближнего ИК диапазона.

Раздел 2.3 посвящен сравнению полученных частот и интенсивностей с литературными данными. Он начинается с обзора источников, включающего спектроскопические базы данных, а также проведенные в обоих рассматриваемых в работе диапазонах теоретические и экспериментальные исследования. Показано в целом хорошее согласие определенных частот и интенсивностей с предшествующими данными в обоих частотных диапазонах. Для дальнего ИК диапазона следует подчеркнуть отличное совпадение наблюдаемых центральных частот линий с результатами [17], которое достигается благодаря более узкому рассматриваемому в работе [17] частотному диапазону в сравнении с расчетами W2020 [14]. Выявлено значительное количество отклонений от данных из базы HITRAN [8] и одного из её основных источников списка W2020 [14] в обоих частотных диапазонах. Примеры наблюдаемых отклонений для центральных частот в дальнем и ближнем ИК-диапазонах проиллюстрированы на рис. 2 и 3, соответственно.

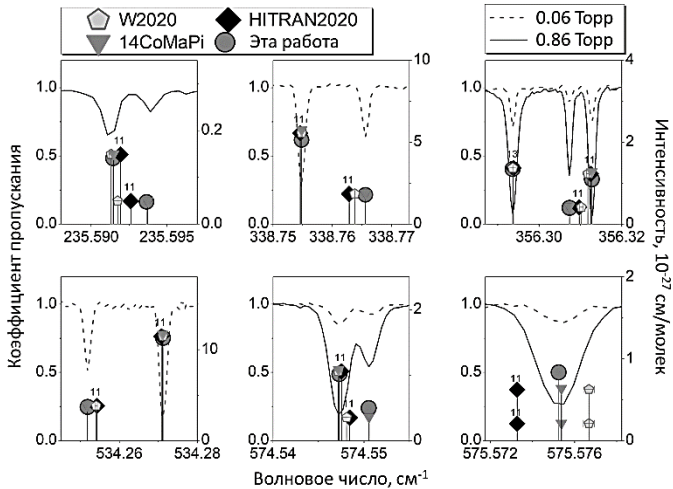


Рис. 2. Сравнение спектров H_2O (линии) с центральными частотами из разных источников (символы) в дальнем ИК-диапазоне. Несогласующиеся частоты соответствуют чисто вращательным переходам H_2^{16}O (номера изотопологов в формате HITRAN представлены на всех панелях)

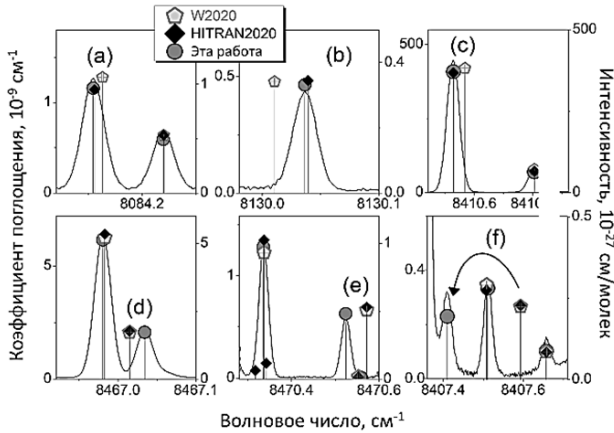


Рис. 3. Сравнение диаграммы спектра H_2O , определенной в этой работе (вертикальные полосы с черно-серыми кругами) на основе спектра в ближнем ИК-диапазоне (сплошная линия), со списками линий W2020 (пятиугольники) и HITRAN2020 (серые круги)

Основные результаты **раздела 2** опубликованы в [A6] (для дальнего ИК-диапазон) и [A9] (для ближнего ИК).

Глава 3 посвящена исследованию связанного с влажностью континуума водяного пара в дальнем и ближнем ИК-диапазонах. В **разделе 3.1** обсуждается методика определения сечений поглощения континуума с использованием зависимостей континуального поглощения от давления, общая как для собственного, так и для стороннего континуума в обоих рассматриваемых в работе частотных диапазонах [A2, A3, A7, A8]. Такой подход позволяет не только получить численные характеристики поглощения, но и подтвердить высокое качество экспериментальных данных. В обоих частотных диапазонах континуум вычислялся как разность между полным наблюдаемым в эксперименте поглощением и резонансным спектром, смоделированным с использованием параметров из базы данных HITRAN, которые для определения стороннего континуума были дополнены результатами расчетов коэффициентов уширения линий водяного пара давлениями азота, основанных на полуэмпирическом модифицированном комплексном формализме Робера-Бонами (MCRB) [30, 31]. Крылья линий обрезались при отстройке частоты от центра на 25 см^{-1} . Подчеркивается разница в измерениях, проведенных в двух частотных диапазонах, так как из нее следуют дальнейшие различия в деталях обработки данных. В дальнем ИК-диапазоне были записаны спектры поглощения в широком диапазоне частот при разных давлениях, из которых извлекалась информация о зависимости поглощения от давления. В ближнем ИК-диапазоне резонаторный спектрометр позволял регистрировать зависимости поглощения от давления напрямую, однако для последующего анализа также

использовались спектры поглощения, записанные дополнительно в узких частотных диапазонах.

Раздел 3.2 посвящен определению коэффициентов собственного континуума в обоих частотных диапазонах и сравнению полученных результатов с литературными данными. В нем уточняются условия эксперимента для обеих серий измерений, демонстрируется, что зарегистрированные зависимости поглощения водяного пара ожидаемо линейны от квадрата давления, а также приводится информация о деталях обработки данных. В дальнем ИК-диапазоне данные получены для водяного пара с естественной концентрацией изотопологов, а также обогащенного H_2^{18}O . Продемонстрирована согласованность результатов определения сечения собственного континуума для этих смесей изотопологов. Рисунки 4 и 5 показывают, что полученные сечения собственного континуума согласуются с предшествующими измерениями в обоих частотных диапазонах и заполняют промежутки между 200-350 и 8302-8500 cm^{-1} , где предшествующие измерения отсутствовали.

Измеренные сечения собственного континуума в дальнем ИК-диапазоне были использованы для уточнения модели MT_CKD [25]. Расчет с помощью обновленной MT_CKD-4.1 дает значение континуума на 30% меньше в области его максимума. В ближнем ИК-диапазоне результаты измерений в целом подтверждают правильность MT_CKD-3.5, однако сравнение выявило спектральную особенность, которая обсуждается в разделе 3.5. Результаты раздела опубликованы в работах [A2, A5] (для дальнего ИК-диапазона) и в [A7] (для ближнего ИК).

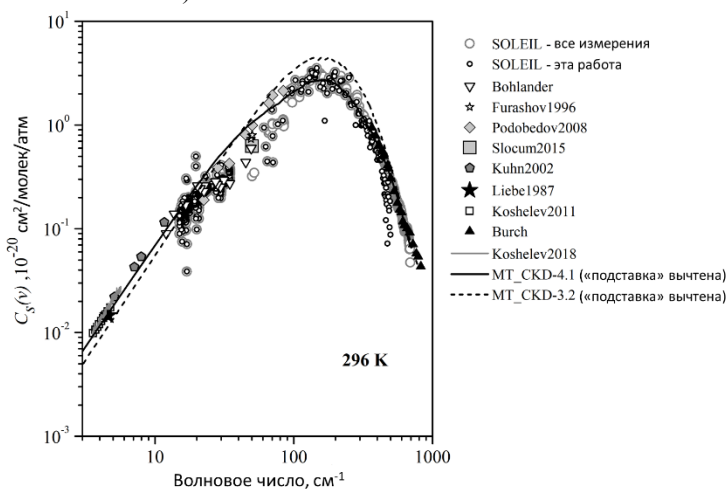


Рис. 4. Сравнение сечений собственного континуума с литературными данными в дальнем ИК-диапазоне

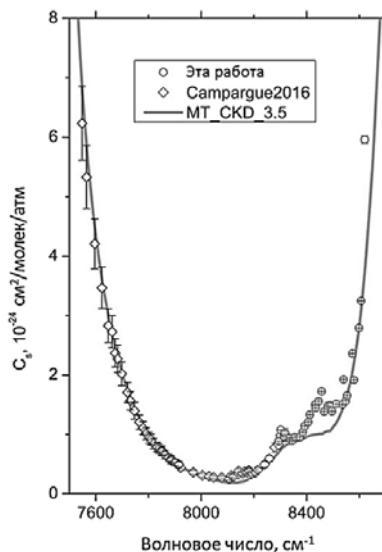


Рис. 5. Сечения собственного континуума H_2O в ближнем ИК-диапазоне. Результаты [32] (ромбы) и этой работы (круги), сравниваются со значениями MT_CKD_3.5 (линия)

В разделе 3.3 обсуждается определение сечений поглощения стороннего континуума водяного пара C_f в смеси с азотом, кислородом и воздухом. Так как величина континуума определяется давлением водяного пара, которое в смеси газов может изменяться из-за адсорбции и десорбции, первая часть раздела посвящена контролю давления H_2O по записанным спектрам с помощью определения интегрального коэффициента поглощения одиночных линий водяного пара в обоих частотных диапазонах. В дальнем ИК-диапазоне ожидаемое парциальное давление водяного пара было подтверждено, в ближнем ИК спектроскопически определённое давление оказалось отличным от заданного примерно на 15%, что потребовало введения соответствующей коррекции. Кроме того, для определения стороннего континуума необходимо учесть все прочие составляющие полного поглощения, к которым в смеси газов, помимо резонансного спектра и собственного континуума водяного пара, добавляются сухой континуум и (в ближнем-ИК диапазоне) потери, связанные с Рэлеевским рассеянием. Продемонстрирован ожидаемый вид зависимостей стороннего континуума от давления в обоих частотных диапазонах, показано, что он не зависит от способа регистрации экспериментальных данных.

В обоих частотных диапазонах показана согласованность полученных сечений стороннего континуума азота, кислорода и воздуха между собой (воз-

душный сторонний континуум складывается из азотного и кислородного с учетом их концентраций; в дальнем ИК-диапазоне кислородный сторонний континуум оказался слишком мал, чтобы было возможно определить его сечение поглощения). Это показано на рис. 6 и 7 для обоих частотных диапазонов.

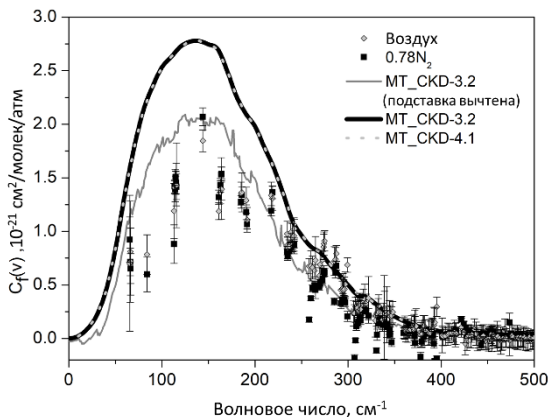


Рис. 6. C_f для смесей H_2O -воздух (ромбы) и H_2O - N_2 (квадраты, умножен на 0,78), полученные в этой работе. Серая сплошная линия – модель MT_CKD-3.2 с вычтенной подставкой. Черная и серая пунктирная линии соответствуют данным MT_CKD-3.2 и MT_CKD-4.1

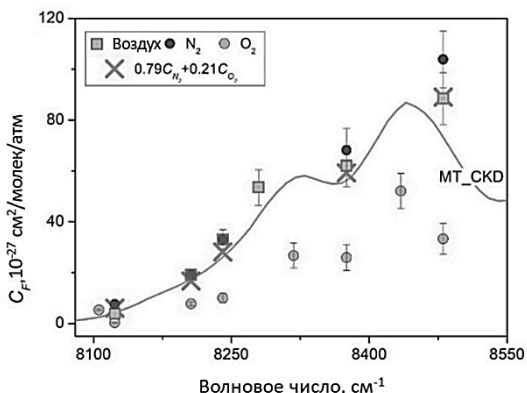


Рис. 7. C_f для N_2 (темно-серые круги), O_2 (светло-серые круги) и воздуха (квадраты), в сравнении с моделью MT_CKD-4.1 для воздуха. Кресты соответствуют значениям C_{air} , полученным из $C_{air} = 0,79C_{N_2} + 0,21C_{O_2}$

Продемонстрировано согласие сечений стороннего континуума с литературными данными и моделью MT_CKD. Отметим, что «пьедестал» (или

«подставка») под резонансными линиями в дальнем ИК-диапазоне был отнесен к резонансному поглощению водяного пара, а не к континууму, как это принято в МТ_СКД. Для корректного сравнения из МТ_СКД вычтены были вычтены, что привело к появлению скачков из-за обрезания крыльев линий. Результаты о стороннем континууме в дальнем ИК-диапазоне опубликованы в [A3], а в ближнем ИК – в [A8].

В разделе 3.4 проведен подробный анализ погрешностей сечений континуального поглощения, которые разделены на две группы: связанные с техникой эксперимента (в частности, шум детектора, стабильность базовой линии и термодинамических условий регистрации экспериментальных данных) и с моделированием резонансного спектра (а именно, корректность его модели и ее параметров и подход к учету вклада дальних крыльев линий). Показано, что неопределенности параметров резонансных линий водяного пара и в особенности их коэффициентов уширения вносят наибольший вклад в неопределенность континуума. Неточности параметров резонансного спектра и связанные с ними неопределенности континуума не оказывают существенного влияния на точность определения суммарного поглощения в микроокнах прозрачности при совместном использовании списка линий и связанных с ним данных о континууме. Однако они вносят систематическое искажение частотной зависимости наблюдаемого континуума, а также затрудняют интерпретацию формирующих его физических механизмов. Основные результаты раздела опубликованы в [A2, A3, A7, A8].

В разделе 3.5 рассматривается физическая природа континуума водяного пара на основе анализа представленных экспериментальных результатов. В дальнем ИК-диапазоне на результатах этой работы, дополненных доступными экспериментальными данными, протестирована физически обоснованная модель собственного континуума водяного пара, учитывающая все механизмы его формирования: бимолекулярное поглощение (спектры стабильных и метастабильных димеров H_2O) и поглощение дальних крыльев резонансных линий [A4]. Данные, полученные в ближнем ИК-диапазоне, позволили обнаружить отсутствующий в модели МТ_СКД вклад полосы димеров воды в наблюдаемый континуум [A7].

В заключении приведены основные результаты работы, а также обозначены перспективы продолжения исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Определены центральные частоты и интенсивности 8400 резонансных линий H_2O на основе оптимизации параметров теоретических функций профиля линии к зарегистрированным спектральным линиям. Измеренные частоты позволили уточнить (а в некоторых случаях определить впервые) энергии уровней молекулы воды. Составлены списки линий, содержащие

информацию о параметрах линий (частоты и интенсивности), с их неопределенностями, квантовыми числами перехода, и энергией нижнего уровня. Диапазон по интенсивности достигает 7 и 4 порядков величины в дальнем и ближнем ИК-диапазонах, соответственно.

2. Показано согласие полученных параметры линий с предшествующими экспериментальными и теоретическими данными. В ближнем ИК-диапазоне точность определения частот переходов H_2O увеличена на 1–2 порядка и получены параметры линий с интенсивностями на 2 порядка меньшими, чем при предыдущих измерениях в том же диапазоне частот. Выявлено большое количество неточностей в идентификации линий H_2O , их положениях и интенсивностях в широко используемой спектроскопической базе данных HITRAN.
3. Получены высокоточные лабораторные данные о связанном с влажностью атмосферном континууме при комнатной температуре и давлениях до 1 атм. Это первые измерения в диапазонах частот 200–350 и 8300–8500 cm^{-1} . Измерения выполнены в микроокнах прозрачности между линиями H_2O в чистом водяном паре и его смеси с воздухом, а также с его основными составляющими азотом и кислородом. Полученные результаты согласуются с предшествующими измерениями собственного континуума водяного пара. Вместе с предшествующими и последующими измерениями при других температурах представленные данные позволяют получить информацию о температурной зависимости континуума.
4. В дальнем ИК-диапазоне представленные результаты подтверждены последующими измерениями при более высоких давлениях водяного пара. Эти два набора данных использованы для уточнения модели MT_CKD (учтены в версии 4.1) [25], что привело, в частности, к уменьшению модельного континуума на 30% в области максимума вблизи 180 cm^{-1} . Измерения континуума в ближнем ИК-диапазоне в основном подтверждают корректность современной версии MT_CKD.
5. Проведен подробный анализ погрешности измеренного континуума. Показано, что неопределенность параметров линии H_2O является одним из основных источников ошибок, значительно превышающим неопределенности, связанные с экспериментальной техникой и методом анализа данных. Анализ записей при разных давлениях подтверждает, что неточности в вычитании резонансного спектра приводят к негладкой частотной зависимости континуума, могут искажать его величину и сказываться на точности физической интерпретации данных. Тем не менее, из полученных результатов следует, что оценки неопределенности параметров линий в HITRAN несколько завышены. Для уточнения данных о спектре континуума необходимо существенное повышение точности расчета коэффициентов столкновительного уширения. Однако неточности, связанные с параметрами резонансного спектра, не отразятся на практическом использо-

вании полученных данных, если они будут применяться совместно с той же моделью резонансного спектра, с которой были получены, в рамках рассмотренных в работе термодинамических условий.

- Полученные данные о собственном континууме в дальнем ИК-диапазоне позволили продемонстрировать возможность построения модели континуума с учетом всех механизмов его формирования (бимолекулярное поглощение и поглощение крыльев резонансных линий) на основе квантово-химического расчета спектра димера.
- В спектре собственного континуума водяного пара в ближнем ИК выявлен пик, отсутствующий в модели MT_CKD, с центром около 8455 см^{-1} . Он предварительно интерпретируется как колебательно-вращательная полоса связанных димеров $(\text{H}_2\text{O})_2$. Ранее подобные пики наблюдались вблизи 1600 , 3610 и 3750 см^{-1} и также были идентифицированы как димерные. Таким образом, представленное в этой работе обнаружение спектра димера подтверждает, что димерные особенности проявляются во всем спектральном диапазоне, важном для радиационного баланса Земли.

Список цитированной литературы:

- Kiehl J., Trenberth K.E. Earth's annual global mean energy budget // Bull. Am. Meteor. Soc. – 1997. – V. 78. – P. 197–208
- Sizov F., Rogalski A. THz detectors // Prog. Quantum Electron. – 2010. – V. 34, № 5. – P. 278–347.
- Consolino L., Bartalini S., De Natale P. Terahertz frequency metrology for spectroscopic applications: a review // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. – 2017. – V. 38, № 11. P. 1289–1315.
- FORUM mission website // <https://www.forum-ee9.eu> (дата обращения 21.02.2024).
- Mendonca J., et al. Using a speed-dependent Voigt line shape to retrieve O_2 from total carbon column observing network solar spectra to improve measurements of XCO_2 // Atmos. Meas. Tech. – 2019. – V. 12. – P. 35–50.
- Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Razmolov A.A. Impact of Water Vapor Continuum Absorption on CO_2 Radiative Forcing in the Atmosphere in the Lower Volga Region // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2023. – V. 36, № 2. – P. 162–168.
- Shine K.P., Ptashnik I.V., Rädcl G. The water vapour continuum: brief history and recent developments // Surv. Geophys. – 2012. – V. 33. – P. 535–555.
- Gordon I.E., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. – 2022. – V. 277. – P. 107949.
- Partridge H. Schwenke D.W. The determination of an accurate isotope dependent potential energy surface for water from extensive *ab initio* calculations and experimental data // J. Chem. Phys. – 1997. – V. 106. – P. 4618–4639.

10. Schwenke D.W., Partridge H. Convergence testing of the analytic representation of an *ab initio* dipole moment function for water: improved fitting yields improved intensities // J. Chem. Phys. – 2000. – V. 113. – P. 6592–6597.
11. Polyansky O.L., Zobov N.F., Mizus I.I., Lodi L., Yurchenko S.N., Tennyson J., Császár A.G., Boyarkin O.V. Global spectroscopy of the water monomer // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2012. – V. 370. – P. 2728–2748.
12. Conway E.K., Kyuberis A.A., Polyansky O.L., Tennyson J., Zobov N. A highly accurate *ab initio* dipole moment surface for the ground electronic state of water vapour for spectra extending into the ultraviolet // J. Chem. Phys. – 2018. – V. 149. – P. 084307.
13. Mizus I.I., Kyuberis A.A., Zobov N.F., Makhnev V.Y., Polyansky O.L., Tennyson J. High accuracy water potential energy surface for the calculation of infrared spectra // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2018. – V. 376. – P. 20170149.
14. Furtenbacher T., Tóbiás R., Tennyson J., Polyansky O.L., Császár A.G. W2020: A Database of Validated Rovibrational Experimental Transitions and Empirical Energy Levels of H₂¹⁶O // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2020. – V. 49. – P. 033101.
15. Mikhailenko S.N. Kassi S., Mondelain D., Campargue A. Water vapor absorption between 5690 and 8340 cm⁻¹: Accurate empirical line centers and validation tests of calculated line intensities // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. – 2020. – V. 245. – P. 106840.
16. Furtenbacher T., Császár A.G., Tennyson J. MARVEL: measured active rotational-vibrational energy levels // J. Mol. Spectrosc. – 2007. – V. 245. – P. 115–25.
17. Coudert L.H., Martin-Drumel M.-A., Pirali O. Analysis of the high-resolution water spectrum up to the second triad // J. Mol. Spectrosc. – 2014. – V. 303. – P. 36–41.
18. Conway E.K., Gordon I.E., Kyuberis A.A., Polyansky O.L., Tennyson J., Zobov N.F. Calculated line lists for H₂¹⁶O and H₂¹⁸O with extensive comparisons to theoretical and experimental sources including the HITRAN2016 database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. – 2020. – V. 241. – P. 106711.
19. Ovsyannikov R.I., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Galanina T.A. On the uncertainty of the calculated intensities of the water vapor lines in the sub-THz frequency range // Atmospheric and oceanic optics. – 2023. – V. 36, № 7. – P. 1.
20. Elsasser W.M. Far infrared absorption of atmospheric water vapor // Astrophys. J. – 1938. – V. 87. – P. 497–507.
21. Viktorova A.A., Zhevakin S.A. Absorption of micro-radiowaves in air by water vapor dimers // Rep. Acad. Sci. USSR. – 1966. – V. 171. – P. 1061–1064.

22. Vigasin A.A. Bimolecular absorption in atmospheric gases // *Weakly Interacting Molecular Pairs: Unconventional Absorbers of Radiation in the Atmosphere*. – 2003. – P. 23–48.
23. Serov E.A., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Semenov V.E. On the origin of the water vapor continuum absorption within rotational and fundamental vibrational bands // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2017. – V. 193. – P. 1.
24. Mlawer E.J., Payne V.H., Moncet J.L., Delamere J.S., Alvarado M.J., Tobin D.C. Development and recent evaluation of the MT-CKD model of continuum absorption // *Philos. Trans. R. Soc. A. Math. Phys. Eng. Sci.* – 2012. – V. 370. – P. 2520–2556.
25. Mlawer E.J., Cady-Pereira K.E., Mascio J., Gordon I.E. The inclusion of the MT-CKD water vapor continuum model in the HITRAN molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2023. – V. 306. – P. 108645.
26. Hartmann J.-M. et al. Recent advances in collisional effects on spectra of molecular gases and their practical consequences // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2018. – V. 213. – P. 178.
27. Hartmann J.-M., Boulet Ch., Robert D. Collisional effects on molecular spectra. Laboratory experiments and models. Consequences for applications. 2nd edition. – Amsterdam: Elsevier; 2021.
28. Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Pirali O., Roy P. Water vapor continuum in the range of rotational spectrum of H₂O molecule: new experimental data and their comparative analysis // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2017. – V. 187. – P. 116–123.
29. Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Simonova A., Ptashnik I., Pirali O., Campargue A. Measurement and temperature dependence of the water vapor self-continuum in the 70–700 cm⁻¹ range // *J. Mol. Structure*. – 2020. – V. 1210. – P. 128046.
30. Vispoel B., Cavalcanti J.H., Gamache R.R. Modified complex Robert-Bonamy calculations of line shape parameters and their temperature dependence for water vapour in collision with N₂ // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2019. – V. 228. – P. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.023>.
31. Vispoel B., Cavalcanti J.H., Paige E.T., Gamache R.R. Vibrational dependence, temperature dependence, and prediction of line shape parameters for the H₂O-N₂ collision system // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2020. – V. 253. – P. 107030. doi:10.1016/j.jqsrt.2020.107030.
32. Campargue A., Kassi S., Mondelain D., Vasilchenko S., Romanini D. Accurate laboratory determination of the near infrared water vapor self-continuum: a test of the MT-CKD model // *J. Geophys Res. Atmos.* – 2016. – V. 121, № 13. – P. 180.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Статьи

- A1. Tretyakov M.Yu., Zibarova (Koroleva) A.O. On the problem of high-accuracy modeling of the dry air absorption spectrum in the millimeter wavelength range // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2018. – V. 216. – P. 70–75.
- A2. Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Zibarova (Koroleva) A.O., Pirali O., Roy P., Campargue A. Far-infrared self-continuum absorption of H_2^{16}O and H_2^{18}O ($15\text{--}500\text{ cm}^{-1}$) // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2019. – V. 227. – P. 190–200.
- A3. Koroleva A.O., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Pirali O., Campargue A. The foreign-continuum absorption of water vapour in the far-infrared ($50\text{--}500\text{ cm}^{-1}$) // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2021. – V. 261. – P. 107486.
- A4. Odintsova T.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Campargue A., Tretyakov M.Yu. The atmospheric continuum in the «terahertz gap» region ($15\text{--}700\text{ cm}^{-1}$): Review of experiments at SOLEIL synchrotron and modeling // *J. Mol. Spectrosc.* – 2022. – V. 386. – P. 111603.
- A5. Galanina T.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Campargue A., Tretyakov M.Yu. The water vapor self-continuum in the «terahertz gap» region ($15\text{--}700\text{ cm}^{-1}$): Experiment versus MT_CKD-3.5 model // *J. Mol. Spectrosc.* – 2022. – V. 389. – P. 111691.
- A6. Toureille M., Koroleva A.O., Mikhailenko S.N., Pirali O., Campargue A. Water vapor absorption spectroscopy in the far-infrared ($50\text{--}720\text{ cm}^{-1}$). Part 1: Natural water // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2022. – V. 291. P. 108326.
- A7. Koroleva A.O., Kassi S., Campargue A. The water vapor self-continuum absorption at room temperature in the $1.25\text{ }\mu\text{m}$ window // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2022. – V. 286. – P. 108206.
- A8. Koroleva A.O., Kassi S., Mondelain D., Campargue A. The water vapor foreign continuum in the $8100\text{--}8500\text{ cm}^{-1}$ spectral range // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2023. – V. 296. – P. 108432.
- A9. Koroleva A.O., Mikhailenko S.N., Kassi S., Campargue A. Frequency comb-referenced cavity ring-down spectroscopy of natural water between 8041 and 8633 cm^{-1} // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2023. – V. 298. – P. 108489.

Труды и тезисы конференций

- A10. Koroleva A., Kassi S., Mondelain D., Campargue A. Room temperature water vapour continuum measurements in the 1.25 μm atmospheric window // The Twenty-eighth Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Dijon, 2023. P. 96.
- A11. Koroleva A., Mikhailenko S., Kassi S., Campargue A. The water vapour selective absorption spectrum in the 8040–8630 cm^{-1} range // The 26th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Prague, Czech Republic, 2022. D5.
- A12. Koroleva A., Kassi S., Mondelain D., Campargue A. The water vapour self- and foreign-continuum absorption at room temperature in the 1.25 μm window // The 26th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Prague, Czech Republic, 2022. G3.
- A13. Koroleva A., Mikhailenko S., Kassi S., Campargue A. The water vapour selective absorption spectrum in the 8040–8630 cm^{-1} range // 15th ASA Conference, Reims, France, 2022. P. 30.
- A14. Campargue A., Kassi S., Mondelain D., Vasilchenko S., Fleurbaey H., Tourelle M., Koroleva A., Mikhailenko S. Water absorption spectroscopy: Continuum measurements and Validation tests of spectroscopic databases // 15th ASA Conference, Reims, France, 2022. P. 8.
- A15. Koroleva A., Kassi S., Mondelain D., Campargue A. The water vapour self- and foreign-continuum absorption at room temperature in the 1.25 μm window // 75th international symposium on molecular spectroscopy 2022, Urbana-Champaign, IL, USA, 2022. P. 287.
- A16. Одинцова Т.А., Королева А.О., Серов Е.А., Кошелев М.А., Третьяков М.Ю. Природа нерезонансного поглощения в газах: обзор недавних результатов // Двадцать шестая научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород. 2022. С. 306–309.
- A17. Campargue A., Mikhailenko S., Kassi S., Koroleva A., Vasilchenko S. Validation tests of the W2020 energy levels of water vapour // 27th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS Cologne 2021), P. 114.
- A18. Odintsova T.A., Koroleva A.O., Simonova A. A., Pirali O., Campargue A., Ptashnik I.V. and Tretyakov M.Yu. On the origin of the water vapor continuum absorption within H₂O rotational band // 27th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS Cologne 2021). P. 209.
- A19. Koroleva A.O., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu, Pirali O. and Campargue A. Foreign water vapour continuum in the far-infrared (50–500 cm^{-1}) // 27th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS Cologne 2021), P. 213.

- A20. Королева А.О., Одинцова Т.А., Третьяков М.Ю., Pirali O., Campargue A. Исследование поглощения водяного пара в дальнем ИК диапазоне для атмосферных приложений // Двадцать четвертая научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород. 2020. С. 248–251.
- A21. Зибарова (Королева) А.О., Одинцова Т.А., Третьяков М.Ю., Roy P., Pirali O., Campargue A. H₂O-N₂ континуум в области вращательного спектра мономера // 24-я Нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород, 2019. С. 90–92.
- A22. Зибарова (Королева) А.О., Одинцова Т.А., Третьяков М.Ю., Roy P., Pirali O., Campargue A. Анализ современных представлений о континууме водяного пара // Двадцать третья научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород. 2019. С. 334–337.
- A23. Odintsova T.A., Zibarova (Koroleva) A.O., Tretyakov M.Yu., Pirali O., Campargue A. Foreign water vapor continuum data in the far infrared // XIX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus. 2019, Nizhny Novgorod, Russia, 2019. P. 82.
- A24. Odintsova T.A., Zibarova (Koroleva) A.O., Tretyakov M.Yu. On a problem of water self-continuum frequency dependence // XIX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus. 2019, Nizhny Novgorod, Russia, 2019. P. 164.
- A25. Зибарова (Королева) А.О., Третьяков М.Ю. Природа сухого атмосферного континуума в миллиметровом диапазоне длин волн // 23-я Нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород, 2018. Т. 2. С. 18–20.
- A26. Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu, Zibarova (Koroleva) A.O., Pirali O., Roy P., and Campargue A. Far IR continuum absorption of H₂¹⁶O and H₂¹⁸O // 25th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Bilbao, Spain, 2018. P. 272.
- A27. Serov E., Balashov A., Odintsova T., Koshelev M., Zibarova (Koroleva) A., Tretyakov M. Bimolecular absorption in dry atmospheric gases at millimeter waves: new experimental data and high accuracy modeling // 25th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Bilbao, Spain, 2018. P. 277.
- A28. Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu, Zibarova (Koroleva) A.O., Pirali O., Roy P. and Campargue A. Far IR continuum absorption of H₂¹⁶O and H₂¹⁸O // 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, 2018. S06, P. 36–37.
- A29. Зибарова (Королева) А.О., Третьяков М.Ю. Природа сухого атмосферного континуума в миллиметровом диапазоне длин волн // Двадцать вторая научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород. 2018. С. 310–312.

- A30. Зибарова (Королева) А.О., Одинцова Т.А., Третьяков М.Ю., Roy P., Pirali O., Campargue A. Континуум водяного пара в области вращательного спектра мономера // Двадцать вторая научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2018. С. 313–316.
- A31. Zibarova (Koroleva) A.O., Tretyakov M.Yu. To the question of high accuracy modelling of dry air absorption spectrum in the millimetre wave range // The 25th Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy, Helsinki, Finland, 2017. P. 278.
- A32. Зибарова (Королева) А.О., Третьяков М.Ю. «Сухой» атмосферный континуум: новый взгляд на известные микроволновые измерения // Двадцать первая научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2017. С. 301–304.

КОРОЛЕВА Александра Олеговна

**СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДЯНОГО ПАРА
В ДАЛЬНЕМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНАХ
ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ:
ЛИНИИ И КОНТИНУУМ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 28.03.2024 г.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 17(2024).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46