

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород).

На правах рукописи

Макаров Дмитрий Сергеевич

**СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО
КИСЛОРОДА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ:
ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ
ПОГЛОЩЕНИЯ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ
ТЕМПЕРАТУР**

01.04.03 — радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
М.Ю. Третьяков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
А.П. Коузов

доктор физико-математических наук
А.В. Лапинов

Ведущая организация: Учреждение Российской академии
наук Институт спектроскопии РАН
(г. Троицк).

Защита состоится «12» декабря в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

 Ю.В. Чугунов

Общая характеристика диссертации

Предмет исследования и актуальность темы. В настоящее время глобальный мониторинг атмосферы Земли, получение данных для прогнозирования погоды и предсказания изменений климата, дистанционное зондирование влажности почвы, солености поверхности океана и пр. осуществляются, в частности, с помощью микроволновых и инфракрасных радиометрических измерений. Для проведения измерений используется различная техника, базирующаяся на наземных станциях, на летательных аппаратах и искусственных спутниках Земли. Для восстановления необходимых параметров по результатам измерений используются модельные зависимости (профили) коэффициента поглощения газов, входящих в состав атмосферы, от частоты. Основной вклад в поглощение электромагнитных волн в атмосфере Земли вносят молекулярный кислород и водяной пар. Данные о переходах тонкой структуры молекулы кислорода в миллиметровом диапазоне длин волн вблизи 60 и 118.75 ГГц используются для восстановления вертикального профиля температуры атмосферы [1] и измерения давления на поверхности Земли с помощью бортового оборудования [2, 3]. Для их интерпретации с помощью моделей поглощения необходимы лабораторные измерения констант, характеризующих столкновительное взаимодействие молекул, влияющее на профили соответствующих переходов: параметров уширения, сдвига и столкновительной связи спектральных линий. От точности знания перечисленных параметров непосредственно зависит точность извлекаемой информации. Следует отметить, что и по сей день содержащаяся в спектроскопических базах данных информация о параметрах линий остается неполной. Например, практически во всех базах данных отсутствует информация о параметрах столкновительного сдвига и столкновительной связи линий.

При обработке данных дистанционного зондирования часто используются готовые модели поглощения излучения в атмосфере, содержащими информацию как о параметрах резонансных линий, так и о континуальном поглощении. Для волн мм и субмм диапазона наиболее известная и часто используемая в практических приложениях — эмпирическая модель распространения мм-волн в атмосфере МРМ (Millimeter-wave Propagation Model) [4], определенная для частот от 1 ГГц до 1 ТГц. При атмосферном давлении на форму спектра молекулярного кислорода в мм-диапазоне заметно влияет эффект столкновительной связи линий. Влияние этого эффекта проявляется в несоответствии профиля полосы поглощения вблизи 60 ГГц сумме профилей Ван Флека-Вайскопфа, используемых для моделирования изолированных линий различных

газов в мм-диапазоне. В МРМ учитывается влияние эффекта столкновительной связи в виде малых поправок к профилям линий тонкой структуры, величина поправок пропорциональна давлению. Точность расчета величины поглощения по МРМ, указываемая ее авторами, составляет 2–2.5% и может быть улучшена за счет новых прецизионных лабораторных измерений параметров линий и континуума. В настоящее время разность между результатами экспериментального измерения коэффициента поглощения и моделью носит систематический характер (о чем также упоминается в работе [5]), что указывает на возможность расширения и уточнения модели.

Одна из проблем создания модели поглощения электромагнитных волн мм-диапазона в атмосфере — недостаточное количество экспериментальных данных, на основе которых рассчитываются параметры модели, в широком диапазоне температур, максимально приближенном к диапазону температур, характерному для атмосферы. Поэтому получение новой прецизионной информации о параметрах атмосферных линий и полос поглощения, а также развитие методов моделирования в настоящее время является *актуальной задачей* экспериментальной физики, имеющей как фундаментальное, так и важнейшее прикладное значение.

Целью настоящей диссертационной работы является получение прецизионных данных о мм-спектре поглощения молекулярного кислорода с помощью спектрометра, разработанного для проведения измерений при атмосферном давлении в широком диапазоне температур, а также повышение точности моделирования мм-спектра молекулярного кислорода.

Научная новизна

1. Предложен и реализован способ стабилизации температуры при измерении коэффициента поглощения с помощью резонаторного спектрометра, позволяющий повысить точность измерения коэффициента поглощения.

2. Впервые получен уникальный набор данных о профиле полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц в атмосферном воздухе и изолированной линии на частоте 118.75 ГГц в атмосферном воздухе и в чистом кислороде при температурах от -30° до $+60^{\circ}$ С с точностью измерения коэффициента поглощения не хуже 0.01 дБ/км.

3. Впервые представлена модель профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц, количественно учитывающая влияние эффекта столкновительной связи с помощью использования теории возмущений в виде поправок, пропорциональных первой и второй степени давления и определены параметры столкновительной

связи первого и второго порядка для этой модели.

4. Для изолированной линии на частоте 118.75 ГГц впервые экспериментально измерен параметр температурной зависимости коэффициента столкновительной связи, впервые экспериментально подтверждено совпадение температурных зависимостей коэффициента уширения и коэффициента столкновительной связи.

Научная и практическая ценность. Полученные результаты представляют интерес для развития теории молекулярных столкновений, поскольку в спектре молекулярного кислорода в мм-диапазоне заметно проявление эффекта столкновительной связи линий. Полученные результаты могут быть использованы при проведении радиометрических измерений, таких, как восстановление температурного профиля атмосферы и дистанционное измерение атмосферного давления.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Современная версия спектрометра на базе резонатора Фабри-Перо при использовании температурной стабилизации позволяет проводить прецизионные измерения коэффициента поглощения в мм- и субмм-диапазоне с точностью не хуже 0.01 дБ/км.
2. Полученный в ходе выполнения данной работы набор данных о спектре молекулярного кислорода в миллиметровом диапазоне является на данный момент наиболее точным и полным по диапазону температур, при которых проведены измерения.
3. Модель, использующая кинетический подход для учёта столкновительной связи, учитывает значительную часть влияния столкновительной связи при небольшом числе параметров, характеризующих вклад этой связи в форму полосы.
4. Представленная в работе модель профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц, количественно учитывающая проявление эффекта столкновительной связи в виде поправок, пропорциональных давлению в первом и втором порядке позволяет рассчитывать коэффициент поглощения в диапазоне температур от -30° до $+60^\circ$ С с точностью не хуже 2% от рассчитанного значения. Модель, фактически, является новой версией модели МРМ и рассчитана на широкий круг пользователей.
5. Для изолированной линии молекулярного кислорода, находящейся на частоте 118.75 ГГц показатели температурной зависимости коэффи-

циента уширения и коэффициента столкновительной связи первого порядка совпадают.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 4 статьи статей в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК, 10 докладов в сборниках трудов и тезисов отечественных и международных конференций. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, а также российских и международных конференциях: XVI Международном съезде по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (г.Иркутск), XXII Всероссийской конференции «Распространение радиоволн» (пос. Лоо, Краснодарский край), 21-й международной конференции по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (Познань, Польша), 22-й международной конференции по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (Дижон, Франция), 12-й и 14-й нижегородских сессиях молодых ученых (г. Нижний Новгород), 11-й, 12-й и 14-й конференциях по радиофизике (г. Нижний Новгород).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего и работы автора. Общий объем диссертации составляет 101 страницу, включая 49 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 75 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении определены предмет исследования и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, а также приведены данные по публикациям включенных в диссертацию материалов.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведена общая информация о спектре молекулярного кислорода в миллиметровом диапазоне, особое внимание уделено методам моделирования профиля поглощения при атмосферном давлении с учётом влияния столкновительных эффектов на модельный профиль. Приведённая в первой главе информация используется в дальнейшем при обработке результатов измерений.

Спектр молекулярного кислорода в ММ-диапазоне формируется переходами между подуровнями тонкой структуры, возникающими в результате взаимодействия электронного спина \mathbf{S} и механического момента \mathbf{N} молекулы кислорода. Полный момент молекулы $\mathbf{J} = \mathbf{N} + \mathbf{S}$, и, поскольку $S = 1$, модуль полного момента может принимать значения $J = N \pm 1$. Это означает, что каждому значению вращательного числа

N соответствуют три энергетических уровня с различными J . Переходы тонкой структуры — это переходы с $\Delta N = 0$, $\Delta J = \pm 1$. Принято обозначать эти переходы с помощью значения числа N и знака изменения числа J и выделять две ветви: $N+$ и $N-$, в которых интенсивность и ширина спектральных линий зависят от квантового числа N схожим образом. Все эти переходы находятся в мм-диапазоне длин волн. Центральная частота перехода $N = 1-$ составляет 118.75 ГГц, остальные переходы тонкой структуры находятся вблизи частоты 60 ГГц и при атмосферном давлении формируют широкую полосу сложной формы в диапазоне частот от 50 до 70 ГГц. Кроме переходов тонкой структуры существуют также вращательные переходы с $\Delta N = \pm 2$, и так называемые «нерезонансные переходы» с $\Delta N = \Delta J = 0$, обусловленные тем, что молекула кислорода обладает магнитным дипольным моментом, а магнитодипольные переходы подразумевают сохранение чётности волновой функции, чему формально соответствует и переход без изменения состояния. Следует отметить, что нерезонансные переходы, несмотря на их малую интенсивность, вносят заметный вклад в форму спектра молекулярного кислорода в мм-диапазоне.

Если центральные частоты двух или более линий расположены достаточно близко, а их профили перекрываются, то столкновения молекул могут привести, кроме уширения профилей линий столкновениями, к перераспределению интенсивности между профилями линий. Такое перераспределение интенсивности поглощения между профилями спектральных линий принято называть эффектом столкновительной связи спектральных линий. Также ранее употреблялся термин «интерференция спектральных линий» (не имеющий ничего общего с интерференцией волн), а в зарубежных источниках — «collisional coupling» и «line mixing».

В результате влияния эффекта столкновительной связи спектральных линий, профиль полосы поглощения не может быть представлен в виде суммы профилей Ван Флека-Вайскопфа, рассчитанных для каждой линии, входящей в полосу, профиль изолированной линии также не соответствует профилю Ван Флека-Вайскопфа. В первой главе диссертации приведены два фундаментальных подхода к описанию профиля полосы поглощения с учётом эффекта столкновительной связи линий.

Величина коэффициента поглощения α на частоте ν , пропорциональна значению спектральной функции, определяемой как действительная часть Фурье-образа автокорреляционной функции дипольного момента поглощающей молекулы:

$$F(\nu) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} e^{-2\pi i \nu t} \langle \mathbf{d}(0) \mathbf{d}(t) \rangle dt \quad (1)$$

Чтобы описать столкновительное взаимодействие молекул, можно ввести квантово-механический оператор столкновительной релаксации \mathbf{w} . Диагональные элементы матрицы оператора \mathbf{w} характеризуют уменьшение интенсивности соответствующей линии вследствие столкновительных переходов на другие уровни, а недиагональные — перераспределение интенсивности между выбранной парой линий (индексы матрицы определяют, соответственно, номера линий). В результате функция $F(\nu)$ также может быть переписана следующим образом:

$$F(\nu) = \operatorname{Im} \left(\operatorname{Tr} \left(\rho \mu \mu^T [\mathbf{I} \nu - \nu_0 - i P \mathbf{w}]^{-1} \right) \right) \quad (2)$$

где ν_0 — диагональная матрица, содержащая центральные частоты рассматриваемых переходов, ρ — диагональная матрица, характеризующая населённость нижних уровней соответствующих переходов, μ — вектор, составленный из элементов матрицы оператора дипольного момента, соответствующих рассматриваемым переходам.

Первый подход заключается в использовании теории возмущений для построения спектральной функции. Матрицу $[\mathbf{I} \nu - \nu_0 - i P \mathbf{w}]^{-1}$ можно переписать, представляя собственные числа и собственные вектора матрицы $(\nu_0 + i P \mathbf{w})$ в виде разложения в ряд по степеням давления P . При этом вклад эффекта столкновительной связи в форму профиля полосы поглощения также представляется в виде поправок, пропорциональных степеням давления, к профилю каждой линии. В итоге для коэффициента поглощения можно записать [6]:

$$\alpha(\nu) = \sum_i C_i \nu^2 \left(\frac{P \gamma_i \cdot (1 + g_i P^2) + P y_i \cdot (\nu - \nu_i - \delta \nu_i P^2)}{(P \gamma_i)^2 + (\nu - \nu_i - \delta \nu_i P^2)^2} + \frac{P \gamma_i \cdot (1 + g_i P^2) - P y_i \cdot (\nu + \nu_i + \delta \nu_i P^2)}{(P \gamma_i)^2 + (\nu + \nu_i + \delta \nu_i P^2)^2} \right) \quad (3)$$

где C_i интенсивность i -й линии, ν_i — центральная частота, γ_i — коэффициент уширения, y_i — коэффициент столкновительной связи первого порядка, g_i и $\delta \nu_i$ — коэффициенты столкновительной связи второго порядка.

При использовании теории возмущений, в разложении собственных чисел и векторов матрицы $(\mathbf{v}_0 + iP\mathbf{w})$ в роли малых параметров выступают величины $Pw_{jk}/(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k)$. Условие применимости теории возмущений — малость этих величин по сравнению с единицей. Это условие достаточно хорошо выполняется даже при атмосферном давлении для любой пары линий, принадлежащих одной ветви. При условии пренебрежения величинами элементов матрицы \mathbf{w} , характеризующими столкновительную связь линий, принадлежащих различным ветвям, теория возмущений применима для построения модельного профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи 60 ГГц при любом значении давления, не превышающем 1 атм.

Стоит отметить, что в данном случае нельзя исключать корреляцию коэффициентов столкновительной связи как между собой, так и с другими параметрами, такими как коэффициенты уширения и интенсивности линий (см., например, [5]). Тем не менее, зависимость параметров столкновительной связи от квантового числа имеет регулярный вид, в результате чего число степеней свободы при определении их значений заметно меньше, чем число линий, учитываемых при моделировании [7, 8].

Другой подход к описанию эффекта столкновительной связи линий основывается на описании взаимного влияния различных ветвей или серий линий как единых объектов. В рамках этого подхода также используется информация о характере столкновительного взаимодействия молекул, поэтому он также называется кинетическим.

Корреляционную функцию дипольного момента молекулы $C(t) = \langle \mathbf{d}(0)\mathbf{d}(t) \rangle$ без потери общности можно переписать в виде интеграла:

$$\dot{C}(t) = - \int_0^t K(t')C(t-t')dt' \quad (4)$$

Ядро интегрального оператора $K(t')$ и называется функцией памяти, оно определяет влияние значений $C(t' < t)$ на значение $\dot{C}(t)$. Применяв к записанному выше соотношению преобразование Фурье и проведя простые преобразования, получим:

$$\tilde{C}(\omega) = \frac{C(0)}{i\omega + \tilde{K}(\omega)} \quad (5)$$

Выражение (5) носит общий характер, и главную роль здесь играет Фурье-образ функции памяти $\tilde{K}(\omega)$. Существуют несложные, физически обоснованные и во многих случаях точные способы её конструирования. Если предположить, что энергетическое состояние молекулы после

столкновения определяется лишь статистическим весом этого состояния и никак не зависит от исходного состояния молекулы, Фурье-образ корреляционной функции $C(t)$ примет следующий вид:

$$\tilde{C}(\omega) = \frac{\tilde{C}_0(\omega - i\tau^{-1})}{1 - \tau^{-1}\tilde{C}_0(\omega - i\tau^{-1})/A_\Sigma} \quad (6)$$

где τ^{-1} — характерная частота столкновений, примерно равная средне-взвешенной ширине учитываемых в модели линий при заданных температуре и давлении, A_Σ — интенсивность рассматриваемой полосы, \tilde{C}_0 определяется как:

$$\tilde{C}_0(\omega - i\tau^{-1}) = \sum_m \int_0^\infty A_m \cdot e^{-i(\omega - \omega_m - i\tau^{-1})t} dt = \sum_m \frac{A_m}{i(\omega - \omega_m) + \tau^{-1}} \quad (7)$$

Такое представление о состоянии молекулы после столкновения называется «приближением сильных столкновений». Оно является идеализированным и в крайне редких случаях соответствует действительности.

Анализ матриц релаксации, рассчитанных тем или иным методом, позволяет скорректировать построение корреляционной функции. Так, например, в [9] показано, что значения элементов матрицы релаксации, соответствующих взаимному влиянию спектральных линий, принадлежащих разным ветвям (в случае рассмотрения колебательно-вращательных переходов, как в [9], это P - и R -ветви), меньше, чем значения элементов матрицы, соответствующих взаимному влиянию спектральных линий внутри одной и той же ветви. Таким образом, если исследуемая полоса содержит более одной ветви, в качестве другого идеализированного представления можно предположить, что взаимное влияние спектральных линий возможно только внутри отдельно взятой ветви. Тогда для каждой ветви можно записать выражение (6), ограничив его область действия выражения одной ветвью, а затем сложить профили, рассчитанные для отдельных ветвей. Это приближение называется «приближением изолированных ветвей», и, так же, как и приближение сильных столкновений, является идеализированным. Для того, чтобы наиболее адекватно описать форму полосы поглощения, необходимо различать столкновения, приводящие к столкновительной связи линий принадлежащей одной и той же ветви и столкновения, приводящие к столкновительной связи линий, принадлежащих различным ветвям. В случае с полосой поглощения молекулярного кислорода в мм-диапазоне, необходимо учесть ветви $N+$ и $N-$, ветвь нерезонансных переходов, а так же

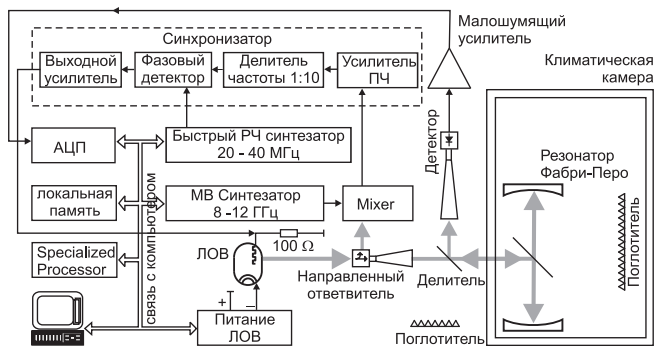


Рис. 1. Блок-схема резонаторного спектрометра

такие же ветви, расположенные на отрицательных частотах. Таким образом, для мм-спектра молекулярного кислорода столкновения делятся те, которые приводят к столкновительной связи внутри отдельной ветви (в приближении изолированных ветвей), к столкновительной связи между парами ближайших по частоте ветвей, и к столкновительной связи в приближении сильных столкновений.

В рамках такого подхода в описании исследуемой полосы поглощения молекулярного кислорода используется два параметра, характеризующих влияние столкновительной связи на форму исследуемой полосы. Модель, построенная по данному принципу, называется моделью варьируемого взаимодействия ветвей или моделью ABC (от «Adjustable Branch Coupling»). Корреляция введенных параметров между собой также невелика. Подробное описание построения модели ABC для исследуемой полосы поглощения приведено в работе [10].

Как показано в данной диссертации, такой способ описания учитывает только часть вклада эффекта столкновительной связи и сравним по точности с учетом проявления столкновительной связи линий в виде поправок, пропорциональных давлению в первой степени, в рамках метода, упомянутого в предыдущем абзаце.

Во второй главе рассматривается устройство спектрометра на основе резонатора Фабри-Перо, приводится описание методики экспериментального исследования изолированной линии и полосы поглощения молекулярного кислорода в миллиметровом диапазоне, применяемых в данной работе.

Блок-схема резонаторного спектрометра, использованного в данной работе, приведена на рис. 1. Спектрометр на основе резонатора Фабри-Перо имеет ряд преимуществ по сравнению, например, с видеоспектрометрами, при измерении коэффициента поглощения при атмосферном давлении: зная параметры резонатора, возможно точно рассчитать распределение поля и параметры пучка в нём, а коэффициент поглощения в исследуемом с помощью резонаторного спектрометра образце, определяется через изменение ширины резонансной кривой резонатора, заполненного образцом и пустого (или заполненного непоглощающим газом) резонатора на частотах, соответствующих собственным модам резонатора. Эти измерения поглощения относятся к разряду частотных измерений и являются более точными на сегодняшний день по сравнению с измерениями амплитуды (коэффициент поглощения как изменение амплитуды измеряется в видеоспектрометрах и спектрометрах РАД [11]). С помощью резонаторного спектрометра измеряется абсолютная величина коэффициента поглощения, что также является важным преимуществом.

Для определения коэффициента поглощения по значению добротности резонатора, в нём, через расположенную под углом 45° к оси резонатора пленку связи, возбуждается ТЕМ ($00q$) волна, где q — номер продольной моды. Резонатор образован двумя сферическими зеркалами диаметром 14 см и радиусом кривизны $R=49$ см, расстояние L между которыми 40–70 см (соотношение между радиусом кривизны и длиной резонатора выбирается из условий устойчивости резонатора и малости дифракционных потерь [12], выбор длины резонатора определяется диапазоном частот, в котором проводятся измерения, таким образом, чтобы снизить дифракционные потери). Собственные частоты f_q резонатора Фабри-Перо можно рассчитать через длину L и радиус кривизны зеркал R по формуле [13, с. 480]:

$$L = \frac{c}{2f_q} \left(q + \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{L}{R} \right) - \frac{c}{4\pi^2 R f_q} \right) \quad (8)$$

где c — скорость света в среде, заполняющей резонатор.

Источником излучения служит ЛОВ, стабилизированная системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) по опорному высокостабильному сигналу синтезатора. Особенность в управлении частотой ЛОВ в резонаторном спектрометре заключается в использовании двух синтезаторов, входящих в систему ФАПЧ и синхронизатора с широкой (~ 200 МГц) полосой пропускания. Микроволновый (МВ) синтезатор диапазона 8–12 ГГц задает центральную частоту излучения ЛОВ, а

быстрый (время переключения частоты ~ 200 нс) радиочастотный (РЧ) синтезатор прямого синтеза (СПС) диапазона 20–40 МГц используется как опорный сигнал синхронизатора для быстрого прецизионного сканирования частоты ЛОВ вокруг установленной МВ синтезатором центральной частоты [14]. СПС обеспечивает сканирование частоты ЛОВ без потери фазы колебаний с минимальным шагом по частоте 0.3 Гц. Минимальное время между шагами по частоте определяется возможностями управляющего микропроцессора и на данном этапе развития экспериментальной установки составляет 58 мкс.

Величиной, измеряемой непосредственно в эксперименте по определению поглощения излучения в образце, заполняющем резонатор, является ширина резонансной кривой Δf резонатора Фабри-Перо. Для определения Δf на каждой собственной моде резонатора осуществляется быстрая запись резонансной кривой в диапазоне $\sim 10\Delta f$, и к экспериментальной записи по методу наименьших квадратов подгоняется теоретическая функция, основанная на контуре Лоренца. Широкополосное сканирование частоты в спектрометре достигается без механической перестройки длины резонатора переходом частоты синтезатора с одной продольной моды резонатора, характеризующейся индексом q , на соседнюю ($q \pm 1, 2, 3, \dots$).

Для измерения поглощения в газообразном образце с помощью резонаторного спектрометра используется тот факт, что при внесении исследуемого образца внутрь резонатора изменяется добротность резонатора Q . Значение добротности Q определяется суммарными потерями мощности излучения за один проход в резонаторе P_Σ и связано с шириной резонансной кривой следующим выражением [13]:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda P_\Sigma} = \frac{f}{\Delta f} \quad (9)$$

где λ и f — соответственно длина волны и частота собственной моды резонатора Фабри-Перо, $\lambda \cdot f = c$, c — скорость света, а суммарные относительные потери мощности P_Σ на один проход излучения внутри резонатора (далее просто «потери») определяются как половина потеря мощности при прохождении излучением в резонаторе пути, равному удвоенному расстоянию между зеркалами $2L$.

Таким образом, на каждой собственной моде резонатора потери P_Σ , состоящие из собственных потерь резонатора $P_{РЕЗ}$ и потерь мощности в заполняющем резонатор газе $P_{ГАЗ}$, определяются через ширину Δf резонансной кривой и длину L резонатора:

$$P_\Sigma = P_{РЕЗ} + P_{ГАЗ} = \frac{2\pi L}{c} \cdot \Delta f \quad (10)$$

Резонаторные потери $P_{РЕЗ}$ (которые также называют аппаратной функцией или базовой линией) складываются из потерь на связь, потерь на отражение от зеркал и дифракционных потерь.

Резонаторные потери невозможно устранить полностью, тем не менее, их можно измерить экспериментально с высокой точностью. Для этого, не меняя конфигурацию элементов резонатора и СВЧ тракта, резонатор заполняется не поглощающим в интересующем нас диапазоне частот газом, близким по показателю преломления к исследуемому образцу. Такими свойствами обладает азот: масса молекулы азота близка к массе молекулы кислорода, показатель преломления в азоте близок к показателю преломления в атмосферном воздухе, коэффициент поглощения в мм-диапазоне у молекулярного азота пренебрежимо мал (см., например, [15]). При заполнении климатической камеры, в которую помещен резонатор, азотом, на каждой собственной моде аппаратная функция $P_{РЕЗ}$ остается неизменной, а слагаемое $P_{ГАЗ}$ равно нулю. В этом случае можно записать:

$$P_{РЕЗ} = \frac{2\pi L}{c} \cdot \Delta f_0 \quad (11)$$

где Δf_0 — ширина резонансной кривой в отсутствии потерь в образце.

В результате, потери в исследуемом образце определяются как

$$P_{ГАЗ} = P_\Sigma - P_{РЕЗ} = \frac{2\pi L}{c} \cdot (\Delta f - \Delta f_0) \quad (12)$$

а выражение для коэффициента поглощения $\alpha(\nu)$ связанного с $P_{ГАЗ}$ как

$$P_{ГАЗ} = 1 - e^{-\alpha(\nu)L} \approx \alpha(\nu)L \quad (13)$$

при условии малости $\alpha(\nu)L$ принимает вид

$$\alpha(\nu) = \frac{2\pi}{c} \cdot (\Delta f - \Delta f_0) \quad (14)$$

Характерный вид потерь в исследуемом газе, аппаратных потерь и их разности представлен на рис. 2.

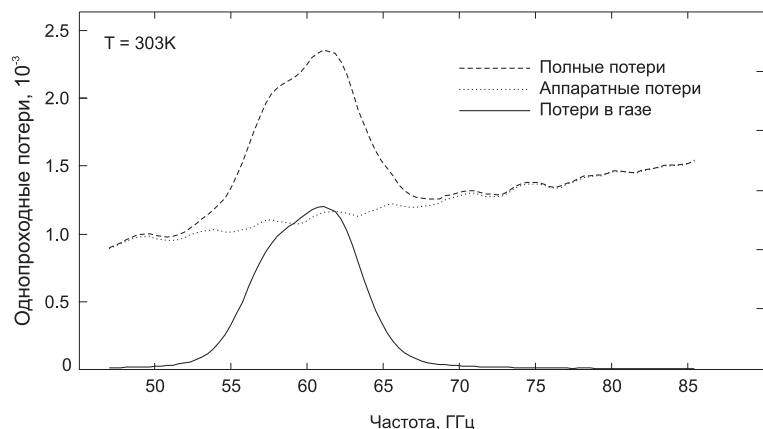


Рис. 2. Однопроходные потери в резонаторе вблизи частоты 60 ГГц. Штрихи — полные потери P_{Σ} , пунктир — аппаратные потери $P_{\text{РЕЗ}}$, сплошная линия — потери в газе $P_{\text{ГАЗ}}$.

Существенным усовершенствованием спектрометра, в котором принимал непосредственное участие автор данной диссертации, является помещение резонатора в климатическую камеру, позволяющую, во-первых, контролировать температуру и влажность образца и, во-вторых, уменьшить шумы измерения коэффициента поглощения. Для поддержания внутри климатической камеры температуры, превышающей комнатную, использовался нагревательный элемент, помещенный в камеру. Температура, обеспечиваемая нагревательным элементом, определялась мощностью, выделяемой на нём, т.е. значением напряжения, питающего нагреватель. Максимальная температура, обеспечиваемая нагревательным элементом, составила $+60^{\circ}\text{C}$. Для охлаждения газа внутри климатической камеры использовалась холодильная установка, радиатор которой также был помещен внутри камеры. Поскольку количество тепла, отводимое холодильной установкой от климатической камеры в единицу времени, постоянно и определяется её внутренними параметрами (такими, как давление охлаждающего газа и конфигурация трубок, подводящих охлаждающий газ к радиатору), непрерывно работающая установка способна обеспечить единственное значение температуры, составляющее -30°C . Для поддержания температуры между минимальным значением, обеспечиваемым холодильной установкой и комнатной температурой, применялось периодическое отключение холодильной установки: с

помощью генератора прямоугольных импульсов регулируемой скважности, управляющего электромагнитным клапаном, охлаждающий газ направлялся в обход радиатора, расположенного внутри климатической камеры. Таким образом регулировалось время охлаждения исследуемого газа внутри климатической камеры по отношению к общему времени работы установки, что позволило поддерживать выбранную температуру, меньшую комнатной. Подробная информация о современной версии спектрометра, использованного в данной работе, приведено в работе [16]

Стабильность поддержания температуры составляет примерно 0.2°C , а диапазон рабочих температур покрывает большую по сравнению с предшествующими исследованиями часть диапазона температур, характерных для атмосферы Земли.

Третья глава диссертации посвящена анализу полученных экспериментальных данных, получению параметров столкновительной связи линий тонкой структуры молекулы кислорода и построению расширенной модели на базе МРМ, количественно учитывающей проявление эффекта столкновительной связи в первом и втором порядке.

В разделе 3.1 рассматривается изолированная линия $N = 1$ — на частоте 118.75 ГГц, профили которой были записаны при температурах -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$ в чистом кислороде и атмосферном воздухе при атмосферном давлении. Профиль изолированной линии с точностью до шумов может быть описан с помощью модельного профиля, учитывающего проявление эффекта столкновительной связи в первом порядке. Были повторно измерены коэффициенты самоуширения и уширения вследствие давления воздуха. Повторное измерение этих величин отчасти обусловлено работой [17], в которой приведены результаты, сильно отличающиеся от результатов предшествующих измерений [18, 19]. Результаты измерений, проведенных в рамках выполнения данной работы, совпали в пределах погрешности с результатами более ранних измерений [18, 19], а также подтверждены измерениями, проведенными с помощью спектрометра РАД при низком давлении. Указаны возможные причины отличия полученных результатов от указанных в [17]. Для линии $N = 1$ — был точно измерен коэффициент столкновительной связи первого порядка и впервые экспериментально определен параметр, характеризующий его зависимость от температуры. Впервые получено экспериментальное подтверждение равенства параметров температурной зависимости для коэффициента уширения и коэффициента столкновительной связи первого порядка. Эти параметры, могут быть использованы в точной модели атмосферного профиля поглощения в миллиметровом диапазоне.

Раздел 3.2 посвящён анализу формы полосы поглощения вблизи частоты 60 ГГц. В подразделе 3.2.1 проанализирована возможность использования модели варьируемого взаимодействия ветвей (АВС) для описания профиля полосы.

С помощью резонаторного спектрометра профиль полосы поглощения вблизи частоты 60 ГГц был записан только при давлении, характерном для атмосферы на уровне, близком к уровню моря. Таким образом, анализируя экспериментальные данные, можно получить лишь зависимости параметров модели АВС, характеризующих столкновительную связь (в дальнейшем обозначаемых C_{BR} и C_{SC}), от температуры при давлении порядка 1 атм. Поскольку необходимо построить модель для расчёта поглощения в широком диапазоне температур и давлений, характерных для реальной атмосферы, необходимо также определить зависимость параметров модели от давления. МРМ изначально была основана на экспериментальных данных, полученных при давлениях от нескольких Торр до атмосферного давления [20], и обеспечивает достаточно точный расчёт коэффициента поглощения как при низких, так и при высоких давлениях. По этой причине для получения зависимостей параметров C_{BR} и C_{SC} от температуры и давления, которые можно было бы рассматривать как опорные для последующей работы с экспериментальными данными, было принято решение использовать профили поглощения, рассчитанные с помощью МРМ при различных температурах в диапазоне от -60°C до $+60^\circ\text{C}$ и давлениях от 10 до 760 Торр. Показано, что модельные профили МРМ и АВС отличаются примерно на 2% от максимального значения поглощения в полосе; столь небольшое отличие указывает на то, что в модели АВС адекватно учитывается большая часть влияния эффекта столкновительной связи спектральных линий. Сравнение остатков обработки реальных экспериментальных данных, полученных в данной работе, моделью АВС с отличием этих же экспериментальных данных от МРМ показывает, что модель АВС даёт примерно в два раза большее отличие от эксперимента, чем МРМ, что особенно заметно на крыльях полосы. Тем не менее, точность модели АВС оказывается сравнимой с точностью МРМ при существенно меньшем числе параметров, характеризующих столкновительную связь. Сравнение зависимостей параметров C_{BR} и C_{SC} от температуры при атмосферном давлении, полученных с помощью обработки расчётных профилей МРМ и данных эксперимента, показывает, что температурные зависимости параметров МРМ не полностью соответствуют реальным температурным зависимостям.

В подразделе 3.2.2 проанализирована модель, в которой проявление эффекта столкновительной связи количественно учитывается в виде поправок, рассчитанных с помощью теории возмущений и пропорциональных первой и второй степени давления. Для расчёта параметров столкновительной связи первого и второго порядка используется алгоритм, основанный на методе Тихонова, приведённом в работе [7]. С помощью этого алгоритма были обработаны записи профиля поглощения исследуемой полосы и получены значения параметров столкновительной связи первого и второго порядка при всех температурах, при которых проводились измерения. Также были проанализированы полученные зависимости параметров столкновительной связи от температуры. На основе полученных данных было проведено расширение МРМ.

Как видно из рис. 3, новая модель, количественно учитывающая проявление эффекта столкновительной связи в первом и втором порядке, более точно описывает экспериментальные данные по сравнению с предшествующей версией МРМ и обеспечивает относительную точность восстановления экспериментальных данных (т.е. отношение разности измеренного и расчётного поглощения к величине измеренного поглощения при данном значении частоты) не хуже, чем 2% в диапазоне от 56 до 64 ГГц, что является заметным улучшением по сравнению с предшествующей версией МРМ.

В подразделе 3.2.3 производится сравнение расчёта коэффициента поглощения с помощью расширенной модели МРМ, параметры которой получены в данной работе, с результатами измерений в субмм диапазоне, представленными в работе [21]. Показано, что коэффициент поглощения, рассчитанный с помощью модели, представленной в данной диссертации, ближе к результатам измерений, чем коэффициент поглощения, рассчитанный с помощью предшествующих версий МРМ ([4, 20, 22]).

Раздел 3.4 посвящён анализу возможностей повышения точности модельного профиля молекулярного кислорода в мм-диапазоне, связанных как с особенностями экспериментальной установки, с помощью которой производились измерения коэффициента поглощения, так и с теоретическими предпосылками и ограничениями, использованными при построении модели. В частности, для дальнейшего увеличения точности измерений предлагается, совместно с использованием более чувствительных детекторов излучения, повышение спектральной чистоты источника, например, с помощью использования в качестве опорного сигнала для стабилизации частоты источника излучения компонент так называемой «гребенки» фемтосекундного лазера, перенесённой в мм/субмм диапазон с помощью полупроводникового элемента [23]. Также предло-

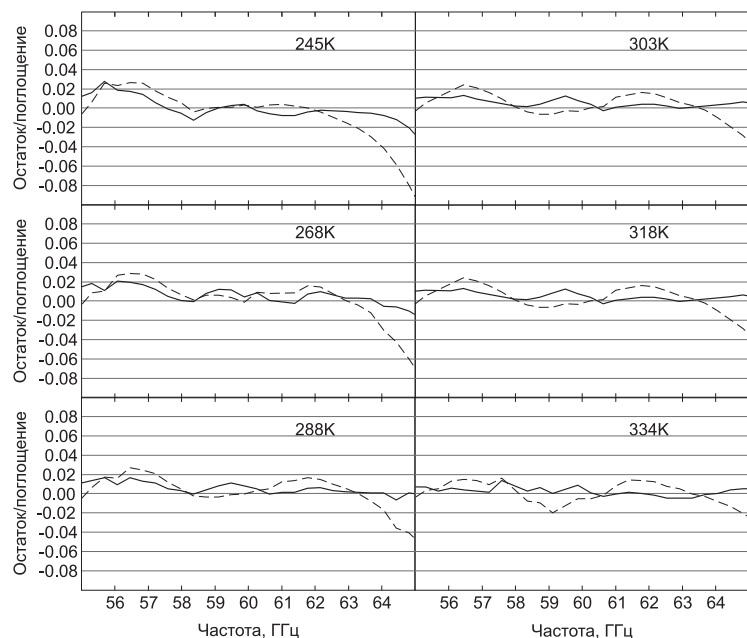


Рис. 3. Относительная точность восстановления экспериментальных данных по МРМ (пунктир) и по новой модели (сплошные линии). Новая модель обеспечивает относительную точность не более 2% в диапазоне 56–64 ГГц

жено использовать искусственный воздух с известным фиксированным содержанием кислорода и азота вместо обычного атмосферного воздуха, что позволит уменьшить шумы, связанные с отклонениями концентрации кислорода.

Для дальнейшего повышения точности моделирования предлагается, во-первых, уточнить температурные зависимости коэффициентов уширения отдельных линий, формирующих полосу поглощения вблизи частоты 60 ГГц, при низком давлении, и, во-вторых, при расчёте матрицы \mathbf{w} и коэффициентов столкновительной связи, включить в рассмотрение межветвевую столкновительную связь, например, используя расчёт по модели ECS (Energy Corrected Sudden) [24–26].

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертационной работы

1. Предложена и реализована модернизация спектрометра на основе резонатора Фабри-Перо, позволяющая поддерживать стабильную температуру при измерениях поглощения электромагнитных волн мм-диапазона молекулярным кислородом в атмосферном воздухе; в результате модернизации спектрометра и, как следствие, уменьшения шумов, связанных с флуктуациями температуры, в пять раз увеличена точность измерения коэффициента поглощения.
2. Получены уникальные по своей точности и диапазону температур, при которых производились измерения, экспериментальные данные о спектре поглощения молекулярного кислорода в атмосфере в миллиметровом диапазоне. Данные получены при атмосферном давлении в диапазоне температур от -30°C до $+60^\circ\text{C}$; точность полученных данных позволяет проводить их обработку с помощью различных теоретических моделей, количественно учитывающих влияние эффекта столкновительной связи линий на форму исследованной полосы.
3. Проведен анализ модели профиля полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц, построенной с использованием кинетического подхода к описанию эффекта столкновительной связи. Показано, что эта модель учитывает значительную часть влияния столкновительной связи при небольшом числе параметров, характеризующих вклад этой связи в форму полосы.
4. Определены параметры модели, построенной на основе теории возмущений для количественного учета вклада эффекта столкновительной связи линий в первом и втором порядке по давлению. Найденные значения параметров позволяют рассчитывать поглощение вблизи частоты 60 ГГц с точностью не хуже 2% от измеренного значения поглощения в интервале температур от -30 до $+60^\circ\text{C}$. Полученная модель, фактически, является новой версией МРМ и рассчитана на широкий круг пользователей.
5. В результате использования высокоточных данных, для изолированной линии на частоте 118.75 ГГц впервые экспериментально измерен параметр температурной зависимости коэффициента столкновительной связи. Экспериментально подтверждено совпадение температурных зависимостей коэффициента уширения и коэффициента столкновительной связи.

Список работ по теме диссертации

- A1. Макаров Д. С., Филиппов Н. Н., Третьяков М. Ю. Использование формализма функций памяти для моделирования профиля поглощения полосы 60-ГГц молекулы кислорода в атмосфере // *Оптика и Спектроскопия*. — 2008. — Т. 105 № 1. — С. 11–18.
- A2. Makarov D. S., Koval I. A., Koshelev M. A. et al. Collisional parameters of the 118-GHz oxygen line: Temperature dependence // *Journal of Molecular Spectroscopy*. — 2008. — V. 252. — Pp. 242–243.
- A3. Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Rosenkranz P. W. 60-GHz oxygen band: precise experimental profiles and extended absorption modeling in a wide temperature range //, *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*. — 2011. — V. 112. — № 9. — Pp. 1420–1428.
- A4. Третьяков М. Ю., Шкаев А. П., Киселев А. М. и др. Стабилизация частоты излучения первичного источника субтерагерцового диапазона частотной гребенкой фемтосекундного лазера // *Письма в ЖЭТФ*. — 2010. — Т. 91. — № 5. — С. 240–243.
- A5. Макаров Д. С., Филиппов Н. Н., Третьяков М. Ю. Использование метода функций памяти для моделирования профиля поглощения 60-ГГц полосы молекулы кислорода в атмосфере // Труды 12-й Нижегородской сессии молодых ученых. — Нижний Новгород, 2007.
- A6. Макаров Д. С., Филиппов Н. Н., Третьяков М. Ю. Моделирование профиля поглощения 60-ГГц полосы молекулы кислорода в атмосфере с использованием функций памяти // Труды (одинадцатой) Научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2007.
- A7. Макаров Д. С., Третьяков М. Ю., Кошелев М. А. и др. Прецизионное исследование температурных зависимостей параметров диагностической атмосферной линии молекулы кислорода на частоте 118.75 ГГц // Труды (двенадцатой) Научной конференции по Радиофизике. — Нижний Новгород, 2008.
- A8. Макаров Д. С., Третьяков М. Ю., Паршин В. В. и др. Поглощение ММ-излучения атмосферным кислородом: возможность точного моделирования // Труды 22-й всероссийской конференции «Распространение Радиоволн». — п.Лоо, Краснодарский Край, 2008.
- A9. Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Koshelev M. A., Parshin V. V. Investigation of the millimeter-wave atmospheric oxygen spectra by

means of the resonator spectrometer // XVI Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy (HighRes-2009), Abstracts of Reports. ”— Tomsk, Russia, 2009.

- A10. Макаров Д. С., Третьяков М. Ю., Паршин В. В., Кошелев М. А. Исследование профиля полосы поглощения молекулярного кислорода в ММ-диапазоне с помощью резонаторного спектрометра // Труды 14-й Нижегородской сессии молодых ученых. — Нижний Новгород, 2009.
- A11. Третьяков М. Ю., Шкаев А. П., Киселев А. М. и др. Фазовая автоподстройка частоты по сигналу фемтосекундного лазера: повышение спектральной чистоты источников излучения ММ и СубММ диапазона // Тезисы докладов XXIV Съезда по спектроскопии. — Москва, Троицк, 2010.
- A12. Макаров Д. С., Третьяков М. Ю., Rosenkranz P. W. Количественное описание проявления эффекта столкновительной связи линий во втором порядке в 60-ГГц полосе поглощения молекулярного кислорода // Труды (четырнадцатой) Научной конференции по Радиофизике. — ННГУ, 2010.
- A13. Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Rosenkranz P. W. 60-GHz oxygen band: to the extension of the mixing model // Book of Abstracts of the 21-st International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy. ”— Poznan, Poland, 2010.
- A14. Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Boulet C. Line mixing in the 60-GHz atmospheric oxygen band: comparison of MPM and ECS model // The 22-nd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy. ”— Dijon, France, 2011.

Список цитированной литературы

1. P.W. Rosenkranz, Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11), 2429–2435.
2. B. Lin, Y. Hu, Numerical simulations of radar surface air pressure measurements at O₂ bands // *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2005, 2(3), 324–328.
3. R. Lawrence, B. Lin, S. Harrah et al., Initial flight test results of differential absorption barometric radar for remote sensing of sea surface air pressure // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 2011, 112(2), 247–253.

4. H.J. Liebe, P.W. Rosenkranz, G.A. Hufford, Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: new laboratory measurement and line parameters // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer.*, 1992, 48(5,6), 629–643.
5. M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, V.V. Dorovskikh et al., 60-GHz oxygen band: precise broadening and central frequencies of fine structure lines, absolute absorption profile at atmospheric pressure, revision of mixing coefficients // *J. Molec. Spectrosc.*, 2005, 231, 1–14.
6. E. Smith, Absorption and dispersion in the O₂ microwave spectrum at atmospheric pressures // *J. Chem. Phys.*, 1981, 74(12), 6658–6673.
7. P.W. Rosenkranz, Interference coefficients for overlapping oxygen lines in air // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 1988, 39, 281–297.
8. D.S. Makarov, M.Yu. Tretyakov, P.W. Rosenkranz, 60-GHz oxygen band: precise experimental profiles and extended absorption modeling in a wide temperature range // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 2011, 112(9), 1420–1428.
9. N.N. Filippov, M.V. Tonkov, Semiclassical analysis of line mixing in the infrared bands of CO and CO₂ // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 1993, 50(1), 111–125.
10. Д.С. Макаров, Н.Н. Филиппов, М.Ю. Третьяков, Использование формализма функций памяти для моделирования профиля поглощения полосы 60-ГГц молекулы кислорода в атмосфере // *Оптика и Спектроскопия*, 2008, 105(1), 11–18.
11. М.Ю. Третьяков, Д.С. Макаров, М.А. Кошелев, М.В. Тонков, Прецизионные измерения столкновительных параметров спектральных линий с помощью спектрометра с радиоакустическим детектированием поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне // *Приборы и техника эксперимента*, 2008, 1, 87–98.
12. H. Kogelnik, T. Li, Laser beams and resonators // *Applied Optics*, 1966, 5(10), 1550–1567.
13. Р.А. Валитов, С.Ф. Дюбко, В.В. Камышан и др., Техника субмиллиметровых волн, М.: Изд-во «Советское радио», 1969.
14. A.F. Krupnov, M.Yu. Tretyakov, V.V. Parshin et al., Modern millimeter-wave resonator spectrometer of broad lines // *J. Mol. Spectrosc.*, 2000, 202, 107–115.
15. J. Boisssoles, C. Boulet, R.H. Tipping et al., Theoretical calculation of the translation-rotation collision-induced absorption in N₂-N₂, O₂-O₂, and N₂-O₂ pairs // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 2003, 82(1-4), 505–516.
16. M.Yu. Tretyakov, A.F. Krupnov, M.A. Koshelev et al., Resonator spectrometer for precise broadband investigations of atmospheric absorption in discrete lines and water vapor related continuum in millimeter wave range // *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, 80, 093106–1–10.
17. B.J. Drouin, Temperature dependent pressure induced linewidths of and ¹⁸O¹⁶O transitions in nitrogen, oxygen and air // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 2007, 105(3), 450–458.
18. M.Yu. Tretyakov, G.Yu. Golubiatnikov, V.V. Parshin et al., Experimental study of the line mixing coefficient for 118.75 GHz oxygen line // *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2004, 223, 31–38.
19. M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, I.A. Koval et al., Temperature dependence of pressure broadening of the $n = 1$ - fine structure oxygen line at 118.75 GHz // *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2007, 241(1), 109–111.
20. H.J. Liebe, MPM — an atmospheric millimeter-wave propagation model // *Int. J. Infrared Mill. Waves*, 1989, 10, 631–650.
21. A.I. Meshkov, F.C. De Lucia, Laboratory measurements of dry air atmospheric absorption with a millimeter wave cavity ringdown spectrometer // *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer*, 2007, 108(2), 256–276.
22. H.J. Liebe, G.A. Hufford, M.G. Cotton, Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // *Proceedings of the NATO/AGARD Wave Propagation Panel, 52nd meeting.*, 3, Palma de Mallorca, Spain, 1–10.
23. М.Ю. Третьяков, А.П. Шкаев, А.М. Киселев и др., Стабилизация частоты излучения первичного источника субтерагерцового диапазона частотной гребенкой фемтосекундного лазера // *Письма в ЖЭТФ*, 2010, 91(5), 240–243.
24. D.S. Makarov, M.Yu. Tretyakov, C. Boulet, Line mixing in the 60-GHz atmospheric oxygen band: comparison of MPM and ECS model // *The Twenty-second Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy HRMS Dijon 2011, Université de Bourgogne*.

25. A.E. DePristo, S.D. Augustin, R. and H. Rabitz, Quantum number and energy scaling for nonreactive collisions // J. Chem. Phys., 1979, 71, 850–865.
26. H. Tran, C. Boulet, J.-M. Hartmann, Line mixing and collision-induced absorption by oxygen in the A-band: Laboratory measurements, model, and tools for atmospheric spectra computations // Journal of Geophysical Research, 2006, 111, D15210.

Оглавление диссертации

Введение

Глава 1. Спектр молекулярного кислорода в миллиметровом диапазоне длин волн при атмосферном давлении.

1.1 Спектральные линии молекулярного кислорода в мм-диапазоне.

1.2 Общие принципы описания формы спектральных линий и полос.

1.3 Эффект столкновительной связи линий.

1.3.1 Описание проявления эффекта столкновительной связи в рамках теории возмущений.

1.3.2 Применение формализма функций памяти для описания проявления эффекта столкновительной связи линий.

1.4 Выводы.

Глава 2. Методика экспериментального исследования мм-спектра молекулярного кислорода в атмосфере в широком диапазоне температур с помощью резонаторного спектрометра.

2.1 Принцип работы резонаторного спектрометра.

2.2 Методика измерения коэффициента поглощения.

2.3 Особенности работы резонаторного спектрометра при проведении измерений в широком диапазоне температур.

2.4 Выводы.

Глава 3. Анализ экспериментальных данных. Создание улучшенной модели поглощения O_2 в мм-диапазоне.

3.1 Изолированная линия на частоте 118.75 ГГц.

3.2 Полоса поглощения вблизи частоты 60 ГГц.

3.2.1 Анализ данных с помощью модели варьруемого взаимодействия ветвей.

3.2.2 Усовершенствование модели МРМ.

3.2.3 Сравнение расширенной модели МРМ с результатами измерений в субмиллиметровом диапазоне.

3.3 О возможности дальнейшего повышения точности моделирования.

3.4 Выводы.

Заключение

Литература

МАКАРОВ Дмитрий Сергеевич

**СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ: ИЗМЕРЕНИЕ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ
В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР**

Автореферат

Ответственный за выпуск
Д. С. Макаров

Подписано к печати 08.11.2011
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,75. Тираж 100 экз. Заказ № 100(2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46