

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Форма спектральных линий основных атмосферных газов в широком диапазоне  
температур и давлений»**

**Аспирант:** Вилков Илья Николаевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Кошелев Максим Александрович

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.03 Радиофизика

**Форма обучения:** очная

## Общая характеристика работы

*Актуальность исследований.* Глобальный мониторинг атмосферы Земли, получение данных для прогнозирования погоды и предсказания изменений климата, дистанционное зондирование влажности почвы, солености поверхности океана и пр. осуществляются с помощью микроволновых и инфракрасных (ИК) радиометрических измерений. Данный метод основан на наблюдении спектральных особенностей атмосферных газов с привлечением радиометров, базирующихся как на наземных станциях, так и на летательных аппаратах и искусственных спутниках Земли. Так, например, для восстановления вертикального профиля температуры атмосферы используются как миллиметровые (мм) переходы тонкой структуры молекулы кислорода вблизи 60 и 118 ГГц, так и чисто вращательные субмиллиметровые (субмм) переходы на частотах 487.2 и 2502.3 ГГц. Для определения профиля влажности атмосферы Земли разными инструментами используются вращательные переходы молекулы  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  мм и субмм диапазонов на частотах 22.2, 183.3, 325.1, 380.2 ГГц и др.

Для интерпретации данных дистанционного зондирования необходимы точные модели распространения излучения в атмосфере. Зачастую такие модели построены на основе эмпирической информации о параметрах линий: уширения, сдвига, столкновительной связи (интерференции) спектральных линий, параметров, характеризующих зависимость столкновительной релаксации молекул от их скорости («эффект ветра» или SD-эффект от английского speed-dependence), а также температурные зависимости всех этих параметров в диапазоне температур атмосферы. Ошибка определения всех параметров непосредственно влияет на точность модели и, соответственно, на точность извлекаемой из радиометрических данных информации.

Исследование чувствительности методов дистанционного зондирования показало, что основной вклад в ошибку восстанавливаемых параметров атмосферы вносят такие параметры линий, как параметр уширения линии давлением воздуха  $\gamma_{\text{air}}$  и его температурный показатель  $n_{\gamma,\text{air}}$ . Ошибка же в значении константы уширения, превышающая 5%, становится основной в

суммарной ошибке определения параметров атмосферы. По мере развития техники и методов, требования, предъявляемые к точности лабораторных исследований, только возрастают.

За последние десятилетия человек расширил область спутниковых исследований за пределы Земли на другие астрономические объекты, анализ состава которых позволяет понять их происхождение и эволюцию. Для этого на наземные и спутниковые станции устанавливается аппаратура микроволнового и ИК диапазонов длин волн. Для этих целей используются как переход тонкой структуры молекулы кислорода миллиметрового диапазона на частоте 118.75 ГГц, так и чисто вращательный переход на частоте 425 ГГц. От точности знания параметров этих линий зависит точность получаемой информации о составе атмосферы астрономического объекта.

Одна из проблем, с которой сталкиваются исследователи при определении реальной точности данных, используемых для развития спектроскопических баз данных и эмпирических моделей поглощения излучения в атмосфере, – недостаточное число повторных лабораторных исследований параметров линий и, как следствие, невозможность оценить истинную точность и достоверность используемых данных. Этим обуславливается актуальность данной работы – необходима новая прецизионная информация о параметрах важнейших диагностических атмосферных линий мм и субмм диапазона и уточнение уже имеющихся данных.

**Цель работы:** получение высокоточной и достоверной информации о параметрах диагностических линий кислорода и водяного пара в мм/субмм диапазоне в широком интервале температур и давлений.

#### ***Методы исследования***

Для достижения поставленной цели экспериментальные исследования осуществляются с помощью комплекса микроволновых спектрометров и современных методик, развиваемых в ИПФ РАН в течение длительного времени.

Комплекс состоит из двух спектрометров. Первый – спектрометр с радиоакустическим детектором поглощения (РАД спектрометр), работающий при

давлениях от нескольких миллиторр до нескольких десятков торр. Второй – резонаторный спектрометр, работающий при давлениях от нескольких торр до нескольких атмосфер. Использование двух взаимодополняющих инструментов, отличающихся как принципом действия, так и диапазоном рабочих давлений, позволяет получать достоверную спектроскопическую информацию о параметрах линий.

Анализ экспериментальных данных осуществлялся двумя методами. Первый – это традиционный «line-by-line» подход, который подразумевает подгонку модельного контура для каждого отдельного спектра, в результате которого извлекаются параметры линий при заданном давлении. Коэффициенты уширения, сдвига, связи, не зависящие от давления, затем извлекались путем линейной регрессии полученных параметров линии.

Второй метод анализа данных - так называемый мультифит (multispectrum fitting), когда модельная функция подгоняется одновременно ко всем записанным спектрам. Такой подход позволяет заложить в модель линейную зависимость ряда параметров (ширины, сдвига, параметра связи) от давления и уменьшить корреляцию между этими параметрами.

Сравнение численных результатов этих методов позволяет сделать вывод об адекватности используемых для анализа спектров математических моделей, оценить влияние аппаратных эффектов на получаемые результаты, а также сделать выводы о точности и достоверности получаемых значений.

### ***Задачи исследования***

- Экспериментальные исследования мм и субмм спектров кислорода и воды на спектрометре низкого давления (РАД) в максимально возможном диапазоне температур и давлений с учетом особенностей исследуемого образца и спектрометра.

- Экспериментальные исследования мм спектра кислорода на спектрометре высокого давления (резонаторный) в максимально возможном диапазоне температур и давлений с учетом особенностей исследуемого образца и спектрометра.

- Анализ экспериментальных спектров с использованием моделей формы линии, учитывающих различные столкновительные эффекты, извлечение информации о параметрах линии и их температурных зависимостях. Оценка точности и достоверности полученной информации.

- Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами, как между собой, так и с данными других работ.

**Научная новизна** заключается в комплексности подхода для изучения формы линии и определения количественных характеристик. Использование двух инструментов, отличающихся как принципом действия, так и диапазоном рабочих давлений, в совокупности с двумя разными подходами к анализу экспериментальных спектров позволяет получать точную и достоверную спектроскопическую информацию о параметрах молекулярных линий.

#### ***Практическая значимость***

Полученная в работе информация о параметрах линий имеет важное практическое значение для решения задач атмосферной физики и химии, включая мониторинг атмосферы Земли и подстилающей поверхности, предсказания изменений климата и др., а также для развития теории межмолекулярного взаимодействия.

**Достоверность** результатов подтверждается хорошим согласием данных, полученных нами с использованием принципиально разных спектроскопических методов при существенно отличающихся условиях, а также с данными других экспериментальных и теоретических исследований (там, где это сравнение возможно).

#### ***Основные результаты работы:***

С помощью комплекса спектрометров измерены параметры линий тонкой структуры мм спектра молекулы кислорода.

- 1) Впервые продемонстрировано, что в условиях заметного столкновительного уширения отличие формы линии тонкой структуры кислорода вблизи 118 ГГц от базовых контуров, учитывающих только движение молекул и столкновительную релаксацию их состояний

(контура Фойгта или Ван Флека – Вейскопфа), обусловлено «эффектом ветра». Измерены соответствующие параметры для моделирования вклада «эффекта ветра» в контур линии. Достоверность данных подтверждается перекрестными измерениями на двух спектрометрах различного типа действия в широком (от 0.3 до 1000 Торр) диапазоне давлений.

- 2) Определена вращательная зависимость параметров уширения линий давлением кислорода, азота, воды и воздуха в широком диапазоне значений вращательного квантового числа  $N$ .
- 3) Получены оценки возможного сдвига линий давлением кислорода, азота, воды и воздуха в широком диапазоне значений вращательного квантового числа  $N$ .
- 4) Продемонстрирована независимость от вращательного состояния молекулы показателей температурной зависимости параметров уширения и сдвига линий тонкой структуры давлением кислорода, азота и воздуха в широком диапазоне значений вращательного квантового числа  $N$ . Для большинства переходов эти температурные показатели измерены впервые.

С помощью РАД-спектрометра проведено лабораторное исследование поглощения мм/субмм излучения в водяном паре.

- 1) Впервые продемонстрировано, что в условиях заметного столкновительного уширения, отличие формы линии воды вблизи 183 и 380 ГГц от базового контура (Фойгта или Ван Флека – Вейскопфа) обусловлено «эффектом ветра».
- 2) Измерены параметры уширения и сдвига, включая их скоростно-зависимые значения, для линий  $H_2O$  вблизи 183 и 380 ГГц давлением различных газов ( $H_2$ ,  $D_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , He, Ne, Ar, Kr, Xe, CO,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $H_2O$ , воздух) для задач моделирования и развития теории межмолекулярного взаимодействия.

- 3) Уточнены температурные показатели уширения, включая их скоростно-зависимые значения, 183-ГГц линии воды давлением воды и воздуха.
- 4) Впервые измерены температурные показатели сдвига, включая их скоростно-зависимые значения, 183-ГГц линии воды давлением воды и воздуха.

### ***Личный вклад автора***

Автор активно участвовал в развитии техники и методов исследования мм и субмм спектров молекул, подготовке и проведении экспериментов, получении и первичном анализе данных. Основная часть представленных в дипломе экспериментальных данных получена либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в популяризации полученных результатов как на российских, так и международных научных мероприятиях.

### ***Апробация работы***

Основные результаты работы докладывались на конкурсах молодых ученых ИПФ РАН, международных и российских научных конференциях:

- 16 Научной конф. по радиофизике, 11-18 мая 2012 г. ННГУ, Н.Новгород
- 17 Научной конф. по радиофизике, 13-17 мая 2013 г. ННГУ, Н.Новгород
- 18 Научной конф. по радиофизике, 12-16 мая 2014 г. ННГУ, Н.Новгород
- 20 Научной конф. по радиофизике, 12-20 мая 2016 г. ННГУ, Н.Новгород
- 21 Научной конф. по радиофизике, 15-22 мая 2017 г. ННГУ, Н.Новгород
- XVII-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2012 July 2-7, 2012. Zelenogorsk
- XVIII-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2015 June 30 - July 4, 2015. Tomsk
- XIX Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2019 July 1-5, 2019, Nizhny Novgorod
- 23-rd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Budapest, Hungary, 2013 Aug.25-30

- 25th Colloquium of High Resolution Molecular Spectroscopy, University of Helsinki, 20 - 25 August 2017

### ***Публикации***

По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 6 работ в сборниках трудов конференций и 16 тезисов конференций.

### ***Благодарности***

Автор благодарит за поддержку и научные консультации сотрудников отдела микроволной спектроскопии ИПФ РАН, и отдельно заведующего отделом Третьякова Михаила Юрьевича. Автор также благодарит сотрудников отдела 240 ИПФ РАН Серова Е.А и Паршина В.В. за научные консультации и помощь в проведении совместных работ на резонаторном спектрометре. Автор выражает особую благодарность Заргарову А.Е. за квалифицированную помощь в модернизации спектрометров.

### ***Структура работы***

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций по теме и библиографического списка. Работа содержит 96 страниц основного машинописного текста, в том числе 35 рисунков, 8 таблиц, 27 наименований публикаций по теме работы и 70 наименований библиографического списка.



## Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, новизна и практическая значимость получаемых результатов.

**В первой** главе приводится описание комплекса спектрометров и методик экспериментального исследования спектральных линий, применяемых в данной работе, и их основные характеристики. В первом параграфе рассматривается принцип действия спектрометра с радиоакустическим детектированием сигнала поглощения (РАД спектрометра), работающего при относительно низких давлениях образца (от миллиторр до нескольких Торр). Во втором – резонаторного спектрометра, работающего от единиц торр до нескольких атмосфер. Анализируются систематические ошибки, возникающие при работе на этих спектрометрах и связанные, прежде всего, с их аппаратной функцией, предлагаются экспериментальные и аналитические методы ее учета, позволяющие значительно повысить точность данных, получаемых с помощью этих спектрометров.

**Во второй** главе приводятся результаты экспериментального исследования формы линий тонкой структуры кислорода (Рис.1), среди которых параметры уширения и сдвига линий давлением воды, азота и кислорода, температурные зависимости, параметры SD-эффекта и эффекта столкновительной связи линий 60-ГГц полосы.

Исследования зависимости от температуры занимают много времени, поэтому некоторая оптимизация количества изучаемых линий и температурных точек неизбежна. Переходы для исследования были выбраны так, чтобы охватить максимально возможный диапазон значений вращательного квантового числа  $J$  при достаточном качестве (отношение сигнала к шуму 100 и более) получаемых спектров. Всего было отобрано 12 наиболее «сильных» переходов с  $N$  от 1 до 19.

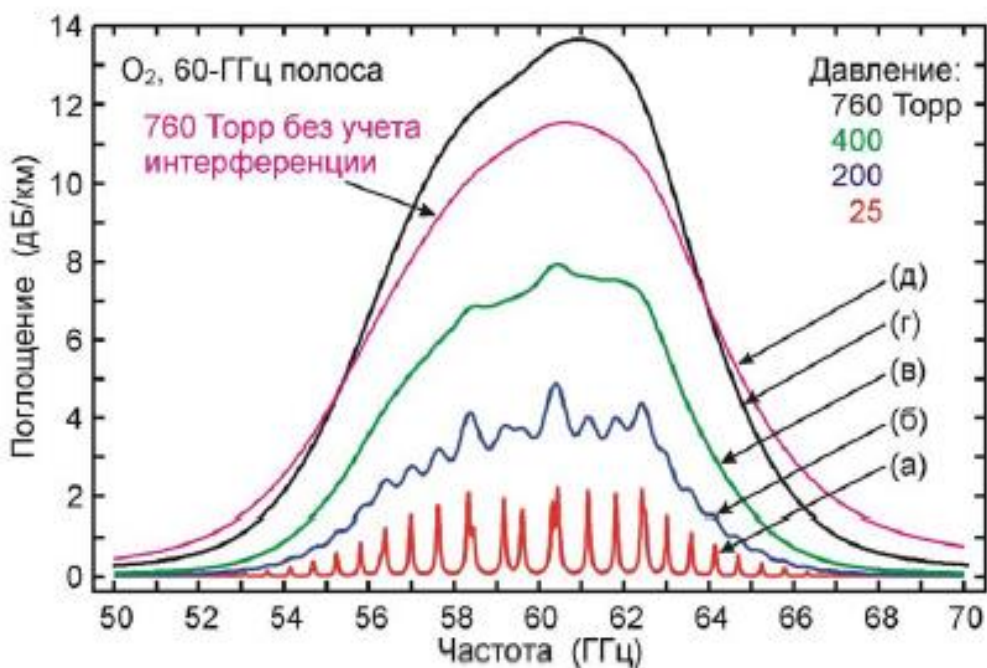


Рис.1 Полоса кислорода в районе 60 ГГц при различных давлениях (результат моделирования с помощью модели МРМ)

Измерения коэффициентов уширения кислородных линий давлением атмосферных газов проводились при 12 температурах в диапазоне от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $75^{\circ}\text{C}$  с шагом  $10^{\circ}\text{C}$ . При каждой температуре спектры регистрировались при 8–10 давлениях в интервале 0,3–3,3 Торр. В случае уширения буферным газом парциальное давление кислорода в смеси устанавливалось от 0,5 до 1 Торр в зависимости от интенсивности исследуемой линии. Затем буферный газ постепенно добавлялся в ячейку с шагом 0,3–0,4 Торр, и после достижения равновесия смеси начиналась запись линии (соответствующее время было экспериментально оценено примерно в 15 мин).



ГГц это соотношение вдвое меньше, и использовался профиль Фойгта. Шумоподобные остатки, показанные на (Рис.2), подтверждают соответствие модельной функции эксперименту. Коэффициент столкновительного уширения линии определялся в результате линейной регрессии экспериментальной зависимости ширины линии от давления (Рис.3).

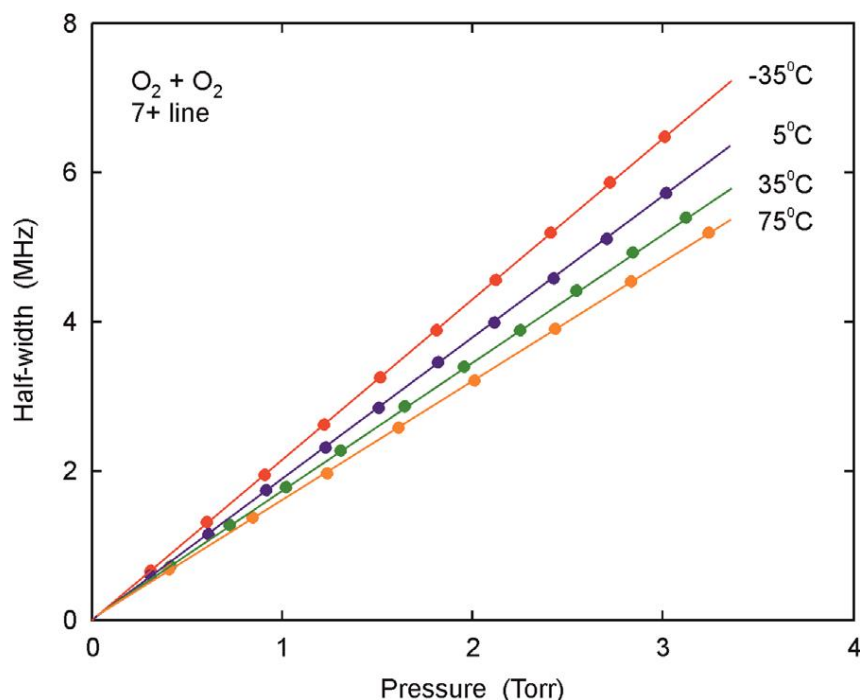


Рис.3 Экспериментальная зависимость полуширины линии 7+ от давления кислорода при различных температурах показана точками. Величина ошибки меньше размера точки. Сплошные линии - это результат линейной регрессии экспериментальных данных.

Окончательное значение коэффициента уширения давлением для каждой конкретной линии при данной температуре было найдено путем усреднения значений, полученных из повторных измерений при различных положениях ячейки.

Коэффициенты уширения и сдвига, как функция температуры  $T$ , описываются показательной функцией (1):

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_\gamma} \quad (1)$$

Для сдвига еще применяется формула Фроста (2):

$$\delta(T) = \delta_0 \cdot \left[\frac{T_0}{T}\right]^{n'_\delta} \cdot \left(1 + A \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)\right) \quad (2)$$

Здесь  $\gamma_0 = \gamma(T_0)$ ,  $\delta_0 = \delta(T_0)$ , а  $T_0$  - опорная температура ( $T_0 = 296\text{ K}$ ).

Таким образом, были измерены коэффициенты уширения  $\gamma(296)$  и их температурные показатели  $n_\gamma$  для 12 линий тонкой структуры кислорода с вращательным квантовым числом  $N$  в диапазоне от 1 до 19, которые продемонстрировали отсутствие вращательной зависимости  $n_\gamma$ .

Параметр воздушного уширения  $\gamma_{air}(296)$  и его температурный показатель  $n_\gamma^{air}$  рассчитывались для каждой изучаемой кислородной линии с использованием соответствующих измеренных значений коэффициентов самоуширения и азотного уширения и их температурных показателей.

Проявление SD-эффекта (эффекта ветра) линии  $N=1$ - при низком и высоком давлении (разные спектрометры) продемонстрировано на (Рис.4 и 5).

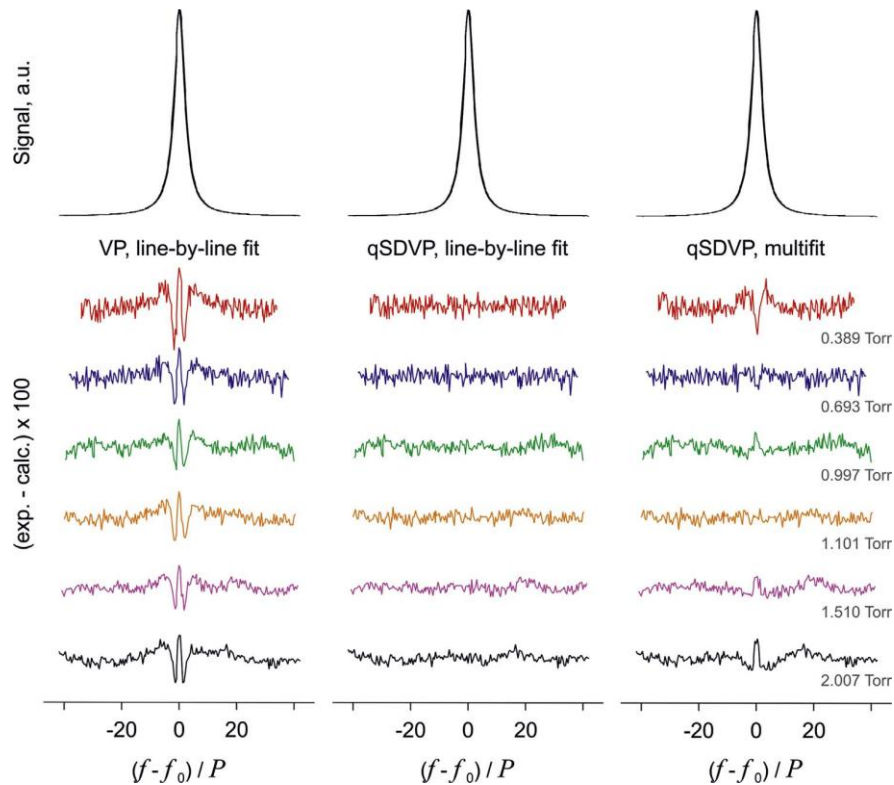


Рис.4 Экспериментальные записи (верхняя часть) кислородной линии  $N = 1$ - и увеличенные в 100 раз остатки подгонки (нижняя часть), полученные с использованием моделей формы линий VP и qSDVP, мультифита и line-by-line анализа. Частотные шкалы (в МГц/Torr) соответствуют частотной отстройке от центра линии (118750.332 МГц), нормированной на давление газа.

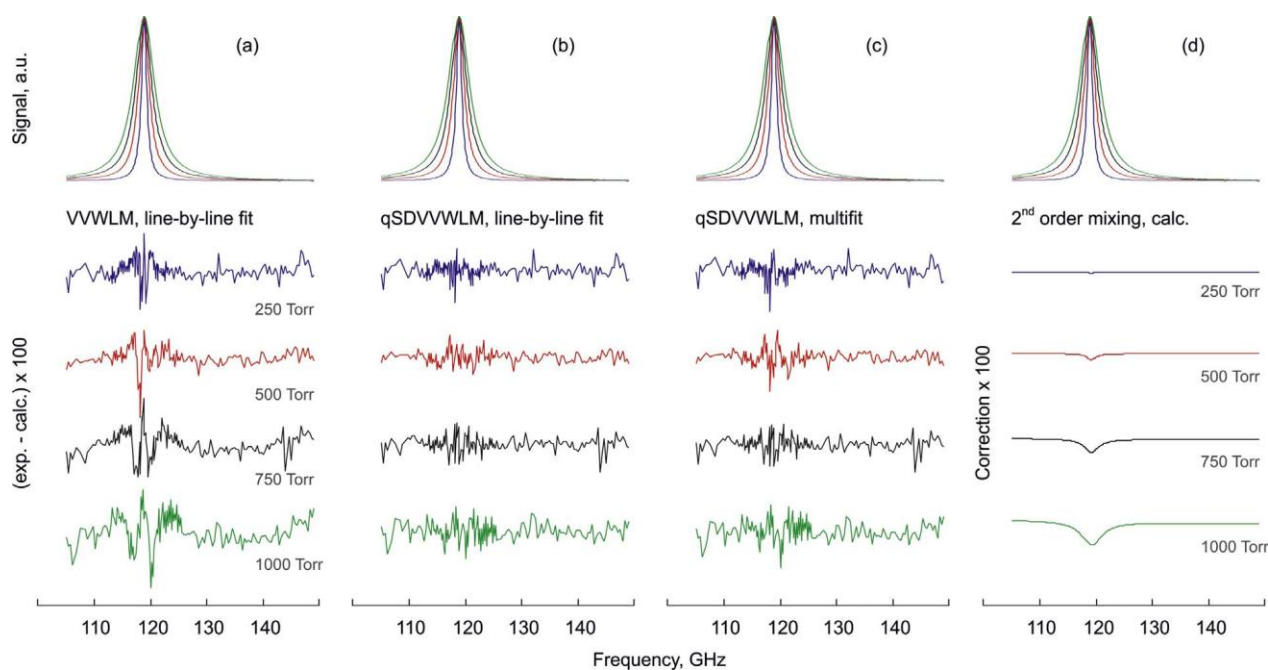


Рис.5 Экспериментальные спектры ((a)-(d), верхняя часть) и увеличенные в 100 раз остатки ((a)-(c), нижняя часть) для кислородной линии  $N = 1$ -, соответствующие обработке моделями VVWLM и qSDVVWLM. Модельная функция, метод обработки и соответствующее давление представлены на рисунке. Часть (d) соответствует расчетному вкладу ( $\times 100$ ) эффекта столкновительной связи 2-го порядка при различных давлениях.

Видно, что пренебрежение SD-эффектом вызывает систематические W-образные искажения в остатках, а модели, учитывающие эффект, обеспечивают очень хорошее описание измеренных спектров с остатками порядка 0,3% от амплитуды или лучше.

Все полученные параметры занесены в итоговые таблицы.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментального исследования параметров линий воды вблизи 183 и 380 ГГц, проведенного методом РАД.

Исследования молекулярного поглощения в водяном паре осложняются свойством молекулы  $H_2O$  осаждаться на всех поверхностях (стенки и окна ячейки, микрофон, зеркала резонатора), а также легко с них «слетать» (адсорбция и десорбция). В результате этого возникают систематические ошибки в определении параметров исследуемых линий.

Для контроля процессов адсорбции/десорбции молекул воды на стенках ячейки спектрометра РАД записывался сигнал поглощения в максимуме

исследуемой линии и по получающейся зависимости определялось характерное время процесса (время достижения равновесия колебалось в диапазоне 30-60 минут в зависимости от содержания воды в смеси)

Пример полученных записей представлен на (Рис.6).

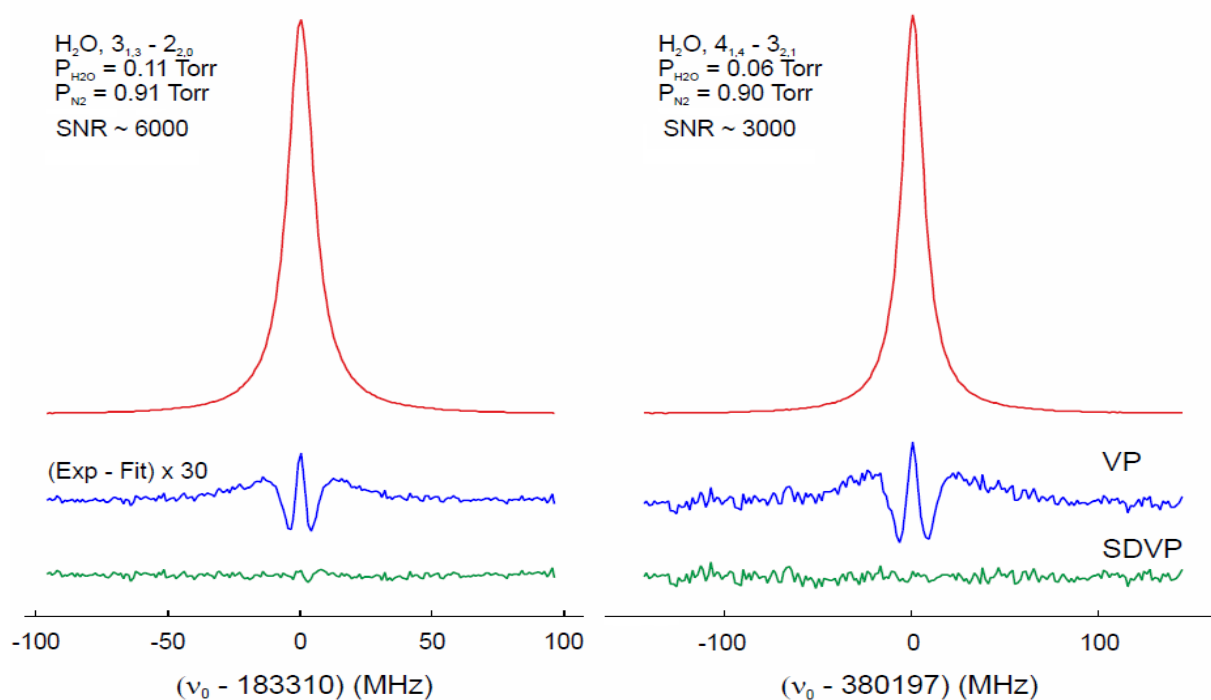


Рис.6 Типичные записи водяных линий в районе 183 и 380 ГГц. (Exp-Fit) – остатки, полученные с помощью различных моделей. Отношение столкновительной ширины к доплеровской составляет 37 и 13, соответственно.

Типичные записи линий воды вблизи 183 и 380 ГГц показан на (Рис. 6), вместе с остатками подгонки различных модельных контуров. При использовании контура Фойгта видно проявление «эффекта ветра» в виде характерного W-образного остатка. Применение контура qSDVP описывает экспериментальные спектр до шумов. При этом ширина линии воды 183 ГГц при учете SD- эффекта возрастает примерно на 1,3% для самоуширения и на 2,5% для уширения воздухом.

Характерные зависимости ширины и центральной частоты линий (на примере линии 380-ГГц) от давления различных буферных газов показаны на (Рис.7), демонстрируя разную эффективность взаимодействия молекул воды с молекулами других газов.

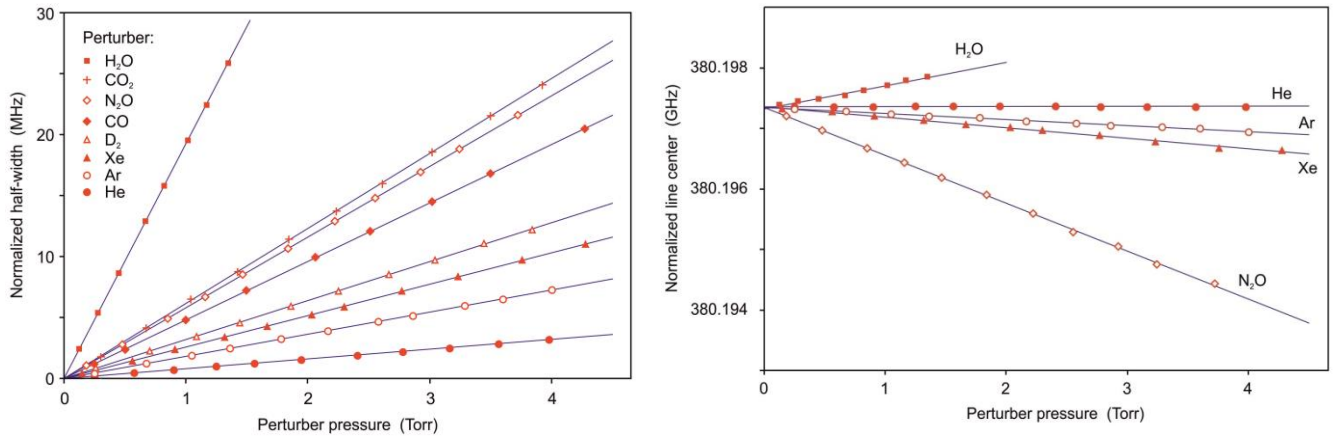


Рис.7. Зависимость ширины (слева) и центральной частоты (справа) линии воды вблизи 380-ГГц от давления различных буферных газов.

Влияние температуры на ширину и центральную частоту линии воды вблизи 183 ГГц показано на (Рис. 8), демонстрируя, что степенной закон с точностью до ошибок эксперимента описывает экспериментальную зависимость для ширины линии, но не всегда для центра. Впервые обнаружено, что параметр самосдвига линии меняет знак при температуре около 280 К с отрицательного на положительный при повышении температуры, и для описания такой зависимости наиболее подходит формула Фроста или квадратичный полином.

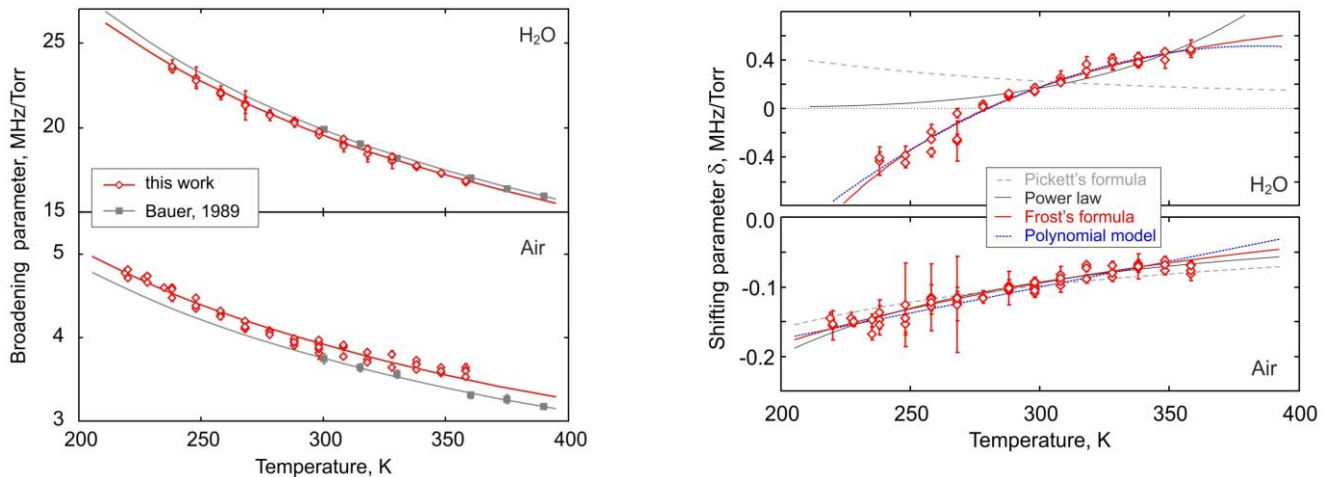


Рис.8. Зависимость параметра уширения (слева) и сдвига (справа) 183-ГГц линии воды от температуры. Обозначения данных и использованных модельных зависимостей приведены на вкладках графиков.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.



## Список работ, опубликованных автором по теме работы

### I. Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и приравненные к ним.

- 1) M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, I.N. Vilkov, E.A. Serov, V.V. Parshin, Resonator spectroscopy of the atmosphere in the 350-500 GHz range, J. Quant. Spectr. Radiat. Trasf. 114 (2013) 109-121
- 2) M.A.Koshelev, I.N.Vilkov, M.Yu.Tretyakov, Pressure broadening of oxygen fine structure lines by water, J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 154 (2015) 24-27
- 3) M.A.Koshelev, I.N.Vilkov, M.Yu.Tretyakov, Collisional broadening of oxygen fine structure lines: The impact of temperature, J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 169 (2016) 91-95
- 4) M.A.Koshelev, T.Delahaye, E.A.Serov, I.N.Vilkov, C.Boulet, M.Yu.Tretyakov, Accurate modeling of the diagnostic 118-Ghz oxygen line for remote sensing of the atmosphere, J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 196 (2017) 78-86
- 5) Д.С. Макаров, И.Н. Вилков, М.А. Кошелев, А.А. Адёркина, М.Ю. Третьяков, Столкновительная связь линий тонкой структуры молекулы кислорода  $^{16}\text{O}_2$  при низком давлении, Известия вузов. Радиофизика Том LX, № 10 (2017) 904-921

### II. Прочие издания.

- 6) Г.В. Федосеев, М.Ю. Третьяков, И.Н.Вилков, М.А. Кошелев, А.Ф. Крупнов, К вопросу о точном описании профиля столкновительно-уширенной молекулярной линии, Труды 16 Научной конф. по радиофизике, 11-18 мая 2012 г. ННГУ, Н.Новгород. Под. ред. С.М. Грача, А.В.Якимова, изд. ННГУ стр. 160-162.
- 7) Г.В.Федосеев, А.Ф.Селезнёв, И.Н.Вилков, М.А.Кошелев, М.Ю. Третьяков, Проявление "эффекта ветра" в форме диагностической атмосферной линии вблизи 380 ГГц, Труды 18 Научной конф. по радиофизике, 12-16 мая 2014 г. ННГУ, Н.Новгород. Под. ред. С.М. Грача, А.В.Якимова, изд. ННГУ. стр.159-161.
- 8) И.Н.Вилков, М.А.Кошелев, М.Ю. Третьяков, Температурная зависимость коэффициентов уширения линий тонкой структуры молекулы кислорода,

- Труды 18 Научной конф. по радиофизике, 12-16 мая 2014 г. ННГУ, Н.Новгород. Под. ред. С.М. Грача, А.В.Якимова, изд. ННГУ. стр.167-168.
- 9) А.О. Зибарова, И.Н. Вилков, М.А. Кошелев, М.Ю Третьяков, Уточнение формы диагностических атмосферных линий водяного пара вблизи 183 и 380 ГГц, "Труды 20 Научной конф. по радиофизике, 12-20 мая 2016 г. ННГУ, Н.Новгород. Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова, изд. ННГУ. стр.148-149.
  - 10) И.Н.Вилков, М.А.Кошелев, Е.А. Серов, М.Ю. Третьяков, К вопросу о точности описания формы диагностической атмосферной линии кислорода вблизи 118 ГГц, Труды 20 Научной конф. по радиофизике, 12-20 мая 2016 г. ННГУ, Н.Новгород. Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова, изд. ННГУ. стр.161-162.
  - 11) Вилков И.Н., Кошелев М.А., Цветков А.И., Глявин М.Ю., Третьяков М.Ю. Способы повышения чувствительности субТГц радиоакустической спектроскопии, Труды 21 Научной конф. по радиофизике, 15-22 мая 2017 г. ННГУ, Н.Новгород. Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова, изд. ННГУ. стр.297-300.
  - 12) M.Yu.Tretyakov, I.N. Vilkov, G.F. Fedoseev, M.A. Koshelev, A.F. Krupnov, To the qestion of pressure broadened molecular line shape, Abstracts of the XVII-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2012 July 2-7, 2012. Zelenogorsk near St. Rep.E10. P.36.
  - 13) E.A. Serov, M.A. Koshelev, V.V. Parshin, I.N. Vilkov, M.Yu.Tretyakov.A.M, Schitov, V.A. Shumilov, Resonator spectroscopy of atmosphere in 350-500 GHz range, Abstracts of the XVII-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2012 July 2-7, 2012. Zelenogorsk near St. Rep. L04. P.86.
  - 14) M.A.Koshelev, I.N.Vilkov, D.S.Makarov, M.Yu.Tretyakov, Pressure broadening of oxygen lines in the 60-GHz band: effects of perturber and temperature, Book of abstracts of The 23-rd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Budapest, Hungary, 2013 Aug.25-30. P.132. Rep.F22
  - 15) D.S.Makarov, M.A.Koshelev, I.N.Vilkov, M.Yu.Tretyakov, Low-pressure verification of collisional coupling models of the molecular oxygen 60-GHz

- band, Book of abstracts of The 23-rd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy, Budapest, Hungary, 2013 Aug.25-30. P.169. Rep.H10
- 16) M.A.Koshelev, I.N.Vilkov, D.S.Makarov, E.A.Serov, V.V.Parshin, M.Yu. Tretyakov, Comprehensive analysis of the molecular oxygen 60 GHz band: Experiment and modelling, Book of Abstracts The 23rd International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Bologna, Italy, September 2-6, 2014. P.148. Rep. SA05
  - 17) Кошелев М.А., Вилков И.Н., Макаров Д.С., Серов Е.А., Паршин В.В., Третьяков М.Ю., Анализ профиля 60-ГГц полосы поглощения кислорода: эксперимент и моделирование, XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Состав Атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы", Борок, 29 сентября - 3 октября 2014 г. Тезисы докладов, с. 31.
  - 18) Е.А. Серов, М.А. Кошелев, И.Н. Вилков, Т.А. Одинцова, В.В. Паршин, М.Ю. Третьяков, Исследование спектра поглощения микроволн атмосферным водяным паром для задач дистанционного зондирования окружающей среды, Шестая международная Школа-семинар: "Спутниковые методы и системы исследования Земли". 02.03 - 06.03.2015, г. Таруса.
  - 19) M.A. Koshelev, V.V. Parshin, G.Yu.Golubiatnikov, E.A. Serov, T.A. Odintsova, I.N. Vilkov, G.V. Fedoseev, M.Yu. Tretyakov, Spectroscopic parameters of the 183-GHz line and underlying continuum, Joint workshop on uncertainties at 183 GHz. Paris, France. 29-30 June 2015.
  - 20) I.N. Vilkov, M.A. Koshelev, G.V. Fedoseev, M.Yu. Tretyakov., Broadening, shifting and speed dependence coefficients of diagnostic water lines, Abstracts of the XVIII-th Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy HighRus-2015 June 30 - July 4, 2015. Tomsk. Rep. H18. P80.
  - 21) M.A. Koshelev, T. Delahaye, E.A. Serov, I.N. Vilkov, C. Boulet, M.Yu. Tretyakov, Line shape study of the 118-GHz oxygen line in a wide pressure range: speed-dependent broadening and line mixing, The 24th international conference on high resolution molecular spectroscopy, 30 August – 3 September, 2016, Prague, Czech Republic, p. 99

- 22) M.A. Koshelev, T. Delahaye, E.A. Serov, I.N. Vilkov, C. Boulet, M.Yu. Tretyakov, Speed-dependent broadening and line-mixing in the 118-GHz oxygen line, 13th ASA Conference (united with 14th HITRAN Conference), University of Reims, Wednesday, 24 August - Friday, 26 August 2016. p. 95
- 23) M.A. Koshelev, T. Delahaye, E.A. Serov, I.N. Vilkov, C. Boulet, M.Yu. Tretyakov, Spectroscopic parameters of the 118-GHz oxygen line shape for atmospheric applications, The 25th Colloquium of High Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS2017), University of Helsinki, 20 - 25 August 2017. p. 155
- 24) M.A. Koshelev, I.N. Vilkov, A.I. Tsvetkov, M.Yu. Glyavin, M.Yu. Tretyakov, Towards high sensitivity of radio-acoustic spectroscopy using «strong microwaves», The 25th Colloquium of High Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS2017), University of Helsinki, 20 - 25 August 2017. p. 156
- 25) I.N. Vilkov, M.A. Koshelev, M.Yu. Tretyakov, Broadening, shifting and speed dependence coefficients of diagnostic H<sub>2</sub>O lines in subTHz region, The 25th Colloquium of High Resolution Molecular Spectroscopy (HRMS2017), University of Helsinki, 20 - 25 August 2017. p. 244
- 26) A.F. Krupnov, S.P. Belov, M.Yu. Tretyakov, G.Yu. Golubiatnikov, V.V. Parshin, M.A. Koshelev, E.A. Serov, I.N. Vilkov, D.S. Makarov, G.M. Bubnov, I.I. Leonov, A.I. Chernova, A.F. Andriyanov and A.P. Shkaev. Accurate broadband THz molecular spectroscopy. EPJ Web Conf. V.195, 06005 (2018).
- 27) Krupnov A.F., Belov S.P., Tretyakov M.Yu., Golubiatnikov G.Yu., Parshin V.V., Koshelev M.A., Serov E.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Bubnov G.M., Leonov I.I., Chernova A.I., Andriyanov A.F., Shkaev A.P.. Accurate broadband THz molecular spectroscopy. 3rd International Conference Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications. TERA2018, October 22–25, 2018, Nizhny Novgorod.