

# Исследование уширения и сдвигов линий поглощения паров $\text{H}_2^{16}\text{O}$ в диапазоне частот 7184–7186 $\text{cm}^{-1}$

А.И.Надеждинский, А.А.Переславцева, Я.Я.Понуровский

*Представлены результаты исследования спектров поглощения паров воды в диапазоне частот 7184–7186  $\text{cm}^{-1}$ . Этот диапазон представляет особый интерес в связи с возможностью применения полученных данных для мониторинга водяного пара в стратосфере Земли. Проанализирован дублет  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  вблизи  $\nu = 7185.596 \text{ cm}^{-1}$ . Найдены коэффициенты уширения и сдвига линий паров воды в выбранном диапазоне в присутствии буферных газов, и проведено их сравнение с результатами, полученными другими авторами.*

**Ключевые слова:** диодный лазер, молекула воды, параметры уширения и сдвига.

## 1. Введение

Прецизионные измерения спектров поглощения паров воды в ближнем ИК диапазоне представляют собой важнейшую задачу, особенно в условиях увеличения влияния парникового эффекта. Водяной пар является одним из основных парниковых газов, ответственных за перенос солнечного излучения в атмосфере Земли. К сожалению, в настоящий момент информация о поглощении излучения молекулами водяного пара в ближнем ИК диапазоне недостаточно полна и точна. Это прежде всего связано с достаточно сложной структурой спектров поглощения в данном спектральном диапазоне, обусловленной наложением составных и комбинационных полос.

Огромное количество работ посвящено исследованию тонкой вращательной структуры спектров поглощения водяного пара в ближнем ИК диапазоне длин волн. Можно отметить наиболее примечательные и полные работы [1–8]. В [4] в стабилизированном диодном лазерном спектрометре была использована трехзеркальная кювета для исследования контуров линий паров воды вблизи частоты 7185.59  $\text{cm}^{-1}$ . Для анализа линий использовались модельные контуры Фойгта, Галатри и Раутиана–Собельмана. В работах [5–8] с использованием фурье-спектрометра были получены спектры высокого разрешения (0.01–0.02  $\text{cm}^{-1}$ ) газовой смеси, состоящей из  $\text{HDO}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Удалось зарегистрировать 2445 линий  $\text{HDO}$  в диапазоне 6000–7700  $\text{cm}^{-1}$ , входящих в полосы (101)–(000), (021)–(000), (210)–(000) и (002)–(000) [7]. Наиболее полная идентификация тонкой вращательной структуры спектров паров воды естественного изотопного состава в ближнем ИК диапазоне длин волн проведена в работах [9–11]

А.И.Надеждинский, Я.Я.Понуровский. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
А.А.Переславцева. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: nastyushk@inbox.ru

Поступила в редакцию 24 сентября 2013 г., после доработки – 14 января 2014 г.

с использованием фурье-спектроскопии и техники CW-Cavity Ring Down Spectroscopy (CW-CRDS). Исследован спектральный диапазон 6885–7408  $\text{cm}^{-1}$ , занимаемый первой гексадой взаимодействующих колебательно-вращательных полос  $\text{H}_2\text{O}$ , полученных частоты и интенсивности более 12700 линий. Это позволило существенно скорректировать спектральные базы данных (HITRAN, GEISA и др.).

В настоящей работе представлены результаты исследования спектров поглощения паров воды в диапазоне частот 7184–7186  $\text{cm}^{-1}$ . Этот диапазон представляет особый интерес в связи с возможностью применения полученных данных для мониторинга водяного пара в стратосфере Земли. Проанализирован дублет  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ , состоящий из колебательно-вращательных линий  $6_{61} \leftarrow 6_{60}$  полосы  $\nu_1 + \nu_3$  и  $5_{23} \leftarrow 6_{16}$  полосы  $2\nu_1$ . Найдены коэффициенты уширения и сдвига этих линий при столкновениях с молекулами буферных газов, а также проведено их сравнение с результатами, полученными другими авторами [4, 7].

## 2. Экспериментальная установка

Для исследования линий поглощения паров воды в спектральном диапазоне перестройки частоты излучения диодного лазера (ДЛ) использовалась экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1.

Установка представляет собой двухканальный диодный лазерный спектрометр с реперным и аналитическим каналами и с форвакуумной системой напуска, откачки и подготовки газовых смесей для аналитической кюветы. Реперный канал предназначен для температурной стабилизации циклов сканирования тока накачки ДЛ по линии поглощения исследуемого газа и абсолютной частотной калибровки спектров поглощения. В канале располагается кювета длиной 20 см и объемом 25 мл с исследуемым (реперным) газом. Окна кюветы были выполнены из стекла марки S-52 (молибденовое стекло) с клином  $1.5^\circ$  для предотвращения интерференции лазерного излучения. Давление паров воды в кювете при температуре  $25^\circ\text{C}$  составляло 13 мбар. Кювета герметично запаивалась.

В аналитическом канале устанавливалась вакуумированная оптическая кювета длиной  $199.8 \pm 0.2$  см с исследуе-

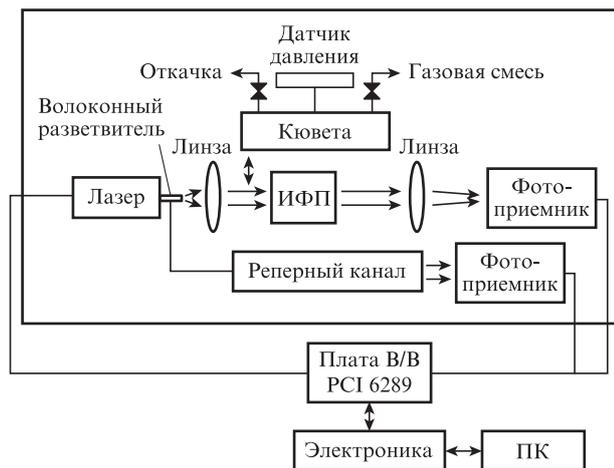


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

мой газовой смесью. Кювета была изготовлена из нержавеющей стали с внутренней полировкой, а ее окна диаметром 30 мм из жаропрочного стекла CaF<sub>2</sub> представляли собой клинья с углом 7°. На корпусе кюветы размещались термодатчик для непрерывного измерения температуры ее внешней поверхности, а также 2 датчика давления: Elemer [12] (диапазон измерения 0–1000 мбар, погрешность измерения 0.2%) и Sensor [13] (диапазон измерения 0–100 мбар, погрешность 0.1%). Для линейаризации частотной шкалы спектров поглощения использовался интерферометр Фабри–Перо (ИФП). Он представлял собой кварцевый резонатор с частично напыленными торцами для создания интерференционной картины высокой добротности (область свободной дисперсии  $\Delta\lambda/\lambda^2 = 1/(2L_{\text{IFP}}n_{\text{IFP}}) = 0.04933(2) \text{ см}^{-1}$ , где  $L_{\text{IFP}} = 69.39(4) \text{ мм}$ , а  $n_{\text{IFP}}$  – показатель преломления материала, из которого состоит ИФП). Для создания параллельного пучка излучения, выходящего из лазера, и для фокусировки излучения на фотоприемник использовались линзы. Фотоприемниками служили pin-фотодиоды (Hamamatsu) [14] с диаметром активной площади 2.0 мм и обнаружительной способностью  $5 \times 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Максимум спектрального отклика на длине волны 1.7 мкм составил 1.1 А/Вт.

Предусилители реперного и аналитического каналов имели следующие параметры: коэффициент преобразования 10 В/мА, полоса пропускания 120 кГц.

Для исследования спектров поглощения паров воды был использован диодный лазер (NTT Electronics) [15] с центральной частотой излучения 1.39253 мкм и с одномодовым волоконным выходом. Выходная оптическая мощность составляла 30 мВт, пороговый ток накачки – 10 мА, максимальный ток – 120 мА, а область перестройки – 10 нм. Система термостабилизации ДЛ, основными элементами которой являются термистор и термоэлектрический холодильник Пельтье, позволяла изменять температуру активного элемента от 2 до 55 °С, при этом нестабильность температуры составляла  $2 \times 10^{-4} \text{ °С}$ . В системе термостабилизации был реализован пропорционально-интегральный закон терморегулирования, а также дополнительный режим термостабилизации по линии поглощения реперного газа.

Система управления и сбора данных диодно-лазерного спектрометра (ДЛС) состояла из 16-разрядной платы ввода/вывода 6289 (National Instruments) с частотой дискретизации 333 кГц, двумя каналами ЦАП и восемью ка-

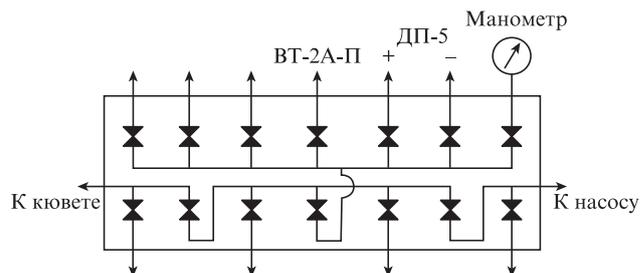


Рис.2. Схема форвакуумного поста.

налами дифференциальных АЦП. Плата мультиплексорная, поэтому для оцифровки каналов АЦП использовалась частота дискретизации 111 кГц.

С помощью вакуумных вентилях оптическая кювета соединялась с форвакуумной системой, схема которой изображена на рис.2. Форвакуумный пост предназначен для откачки оптических кювет и подготовки смесей различного состава. Он снабжен датчиками давления: датчиком дифференциального давления ДП-5 (диапазон измерения 0–133.3 мбар, погрешность 0.5%), образцовым манометром, а также термопарным вакуумметром ВТ-2А-П (диапазон измерения 0.0013–0.267 мбар). Полный внутренний вакуумный объем системы составлял 150 мл.

### 3. Характеристики ДЛС

На рис.3 представлены типичные сигналы с фотоприемников ДЛС. Отношение сигнал/шум при накоплении и усреднении выборки, состоящей из 20 спектров поглощения исследуемых газов, превышало  $10^4$  при характерном времени усреднения этой выборки 2 с. Спектральное разрешение ДЛС составляло  $2 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$  и определялось шириной аппаратной функции спектрометра, напрямую связанной с шириной линии генерации ДЛ. Погрешность определения центра доплеровски уширенной линии поглощения при этом не превышала  $2 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и определялась точностью подгонки контура линии модельными спектрами.

Для исследования шумов оптоэлектронного тракта ДЛС использовалась процедура измерения отклонения Аллана [16], определяющего зависимость квадратного корня из дисперсии измеряемой величины от времени усред-

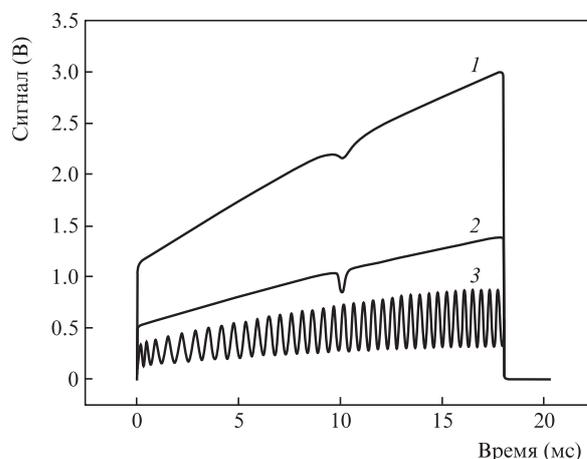


Рис.3. Типичные сигналы с фотоприемников двухканального ДЛС, регистрирующих излучение, прошедшее аналитическую кювету (1), реперную кювету (2), ИФП (3).

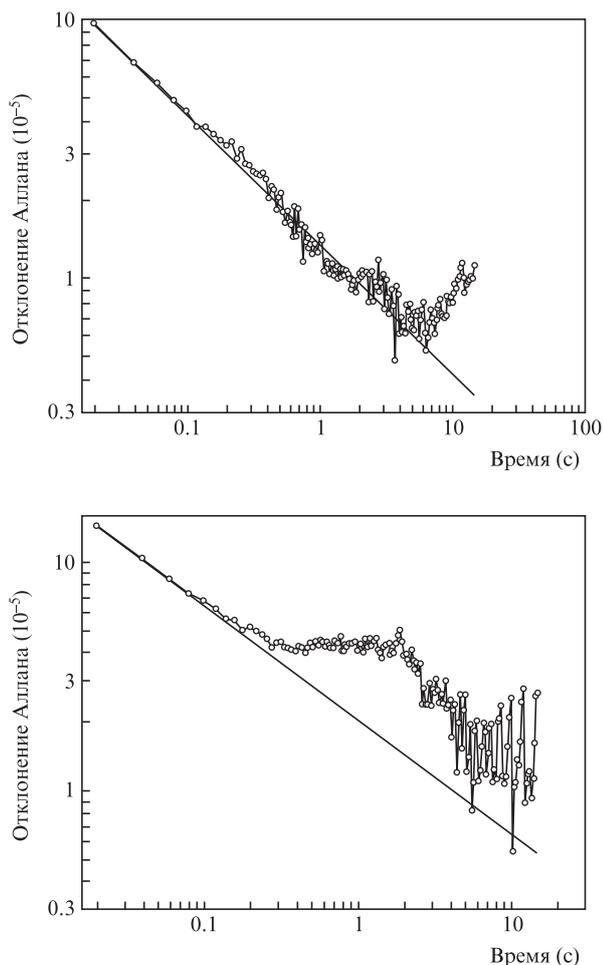


Рис.4. Отклонения Аллана для оптической плотности в кювете (а) и температуры активного элемента ДЛ (б).

нения. Отклонения Аллана для оптической плотности  $D$  и температуры активного элемента ДЛ, измеренные в кювете длиной 2 м в отсутствие поглощающего газа, представлены на рис.4. Видно, что при времени накопления 4 с минимальная измеримая величина оптической плотности достигает  $8 \times 10^{-6}$ , при этом нестабильность температуры равна  $4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ . При большем времени накопления происходит дрейф измеряемой величины  $D$ . Он обусловлен флуктуациями регистрируемого сигнала в отсутствие поглощающего газа в кювете (базовая линия ДЛ), а также другими факторами, оказывающими влияние на точность эксперимента (температура и давление газа и др.). Отклонения Аллана для оптической плотности и температуры нужно учитывать при долговременных измерениях контуров линий поглощения.

Также для исследования шумовых характеристик спектрометра был проведен анализ источников шумов, обусловленных интерференцией лазерного излучения на поверхностях зеркал и окнах кюветы (вторичные источники интерференции). Особенности формирования изображе-

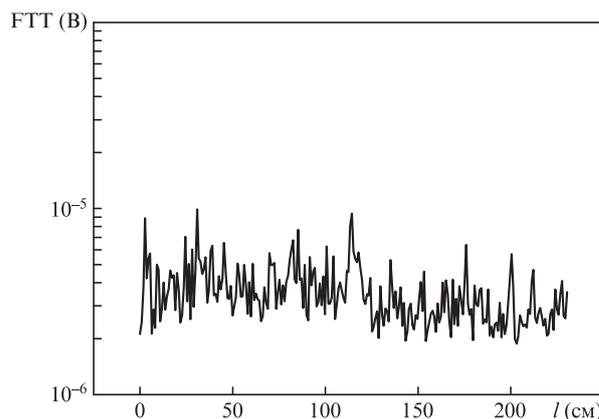


Рис.5. Зависимость фурье-образа FFT выходного сигнала от расстояния  $l$  между ДЛ и источником вторичного излучения, интерферирующего с основным излучением ДЛ, в откачанной кювете длиной 2 м.

ний на зеркалах и окнах кюветы, а также неидеальности зеркал, используемых в экспериментальной установке, приводят к паразитной интерференции, которая влияет на уровень шумов в спектрометре [17]. Для исследования роли вторичных источников интерференции была использована зависимость фурье-образа выходного сигнала от расстояния между ДЛ и источником вторичного излучения, интерферирующего с основным излучением ДЛ, в откачанной кювете длиной 2 м. Эта зависимость представлена на рис.5. Отчетливо видны пики на расстояниях 30 (отражение от входного окна кюветы), 114 (отражение внутри кюветы) и 200 см (отражение от выходного окна кюветы). Влияние этих источников на чувствительность спектрометра приводит к тому, что уровень шумов достигает  $1 \times 10^{-5}$ . Такой уровень шумов дает погрешность, соизмеримую с существующими систематическими ошибками эксперимента (погрешности измерения температуры, давления), поэтому дополнительного подавления интерференционных помех не проводилось.

#### 4. Измерение интенсивностей линий поглощения паров $\text{H}_2^{16}\text{O}$ вблизи $\lambda = 1.392 \text{ мкм}$

В область перестройки ДЛ попадают линии с центрами на частотах  $7185.597 \text{ см}^{-1}$  (Q-ветвь, полоса  $\nu_1 + \nu_3$ , переход  $6_{61} \leftarrow 6_{60}$ ) и  $7185.394 \text{ см}^{-1}$  (P-ветвь, полоса  $2\nu_1$ , переход  $5_{23} \leftarrow 6_{16}$ ). Параметры исследуемых линий, взятые из спектральной базы данных HITRAN-2008 [18], представлены в табл.1.

Ошибка в определении интенсивностей линий не превышает 10%, а неопределенность в нахождении центров линий лежит в диапазоне от 0.01 до 0.001  $\text{см}^{-1}$ . На рис.6 представлен синтезированный спектр линий паров воды вблизи  $\lambda = 1.39 \text{ мкм}$ , полученный при помощи спектральной базы данных HITRAN-2008.

Табл.1. Параметры исследуемых линий, взятые из спектральной базы данных HITRAN-2008 [18].

$\nu_0 \text{ (см}^{-1}\text{)}$	Переход	$S_0 \text{ (см}^{-2}\cdot\text{атм}^{-1}\text{)}$	$\gamma_{\text{air}}^0 \text{ (см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}\text{)}$	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}^0 \text{ (см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}\text{)}$	$E \text{ (см}^{-1}\text{)}$	$n$	$\delta \text{ (см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}\text{)}$
7185.394	$2\nu_1, 6_{16} \rightarrow 5_{23}$	0.001279	0.0924	0.435	447.25	0.72	-0.00892
7185.597	$\nu_1 + \nu_3, 6_{60} \rightarrow 6_{61}$	0.019701	0.0413	0.195	1045.1	0.19	-0.01346

Примечание:  $\nu_0$  – частота центра линии;  $S_0$  – интенсивность линии;  $\gamma_{\text{air}}^0, \gamma_{\text{H}_2\text{O}}^0$  – коэффициенты уширения в воздухе и в собственных парах  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $E$  – энергия нижнего уровня;  $n$  – коэффициент температурной зависимости (экспоненты);  $\delta$  – коэффициент сдвига.

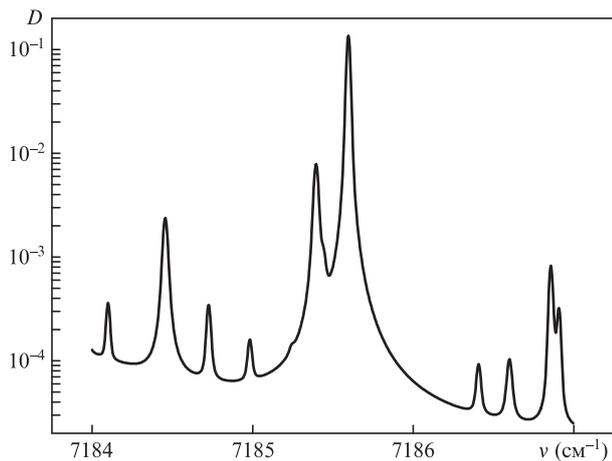


Рис.6. Синтезированный спектр линий поглощения паров воды вблизи 1.39 мкм в кювете длиной 2 м при давлении 101.3 мбар, концентрация паров воды 10%, температура 23 °С.

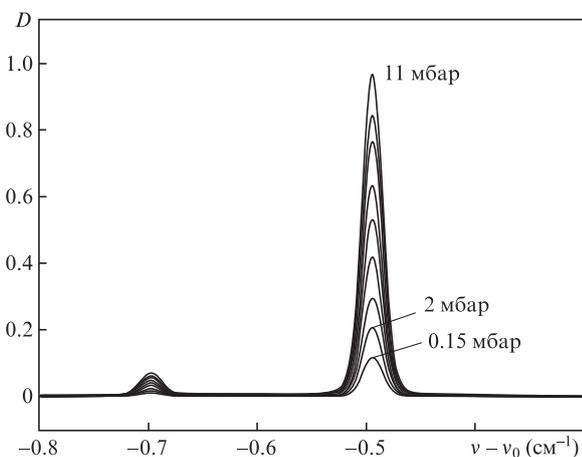


Рис.7. Экспериментальные спектры паров воды при различных давлениях в отсутствие буферного газа. Давление варьировалось от 0.15 до 11 мбар, длина кюветы 2 м.

С помощью вышеописанной установки (рис.1) были получены спектры поглощения паров воды в диапазоне 7184–7186 см<sup>-1</sup>. Кювета длиной 2 м заполнялась водяным паром при температуре 23 °С. Давление паров воды варьировалось от 0.15 до 11 мбар. Перед записью каждого спектра кювета промывалась сухим азотом и вакуумировалась, далее записывалась базовая линия (линия нулевого поглощения). Для управления экспериментом была создана специальная управляющая программа. На рис.7 представлены экспериментальные спектры паров воды в отсутствие буферного газа.

Для нахождения интенсивностей линий поглощения паров воды в условиях уширения собственным газом использовалась модель «hard-collision» (контур Раутиана–Собельмана [19]), т.к. модель Фойгта, не описывающая эффекты сужения линии при столкновениях молекул, в этом случае некорректна. Контур линии поглощения в выбранной модели имеет вид

$$k(\nu - \nu_0) = A \operatorname{Re} \left[ \frac{W(x, y+z)}{1 - \sqrt{\pi z} W(x, y+z)} \right], \quad (1)$$

где  $\nu_0$  – частота центра линии;

$$W(x, y) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{x - t + iy} dt \quad (2)$$

– комплексная функция вероятности;

$$x = \sqrt{\ln 2} \frac{\nu - \nu_0}{\gamma_D}; \quad y = \sqrt{\ln 2} \frac{\gamma_L}{\gamma_D}; \quad (3)$$

$$z = \sqrt{\ln 2} \frac{\zeta}{\gamma_D};$$

$\gamma_L$  – полуширина лоренцевского контура на полувысоте;

$$\gamma_D = 3.5812 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{M}} \nu_0 \quad (4)$$

– полуширина доплеровского контура на полувысоте;  $\zeta = \zeta^0 P$  – параметр сужения Дикке, характеризующий эффективную частоту столкновений;  $P$  – давление буферного газа;  $\zeta^0$  – коэффициент сужения (в см<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>);  $T$  – температура;  $M$  – молекулярная масса.

Величина  $z$  описывает изменение скорости частиц при столкновении, которое должно уменьшать вклад доплеровского уширения.

Использовалась программа подгонки контуров линий моделью Раутиана–Собельмана, позволяющая работать с мультиплетными линиями [20]. Процедура подгонки выполнялась в режиме «LinebyLine», когда каждая экспериментальная точка коэффициента поглощения являлась суммой аддитивных вкладов коэффициентов поглощения каждой линии поглощения, находящейся в спектральном диапазоне подгонки. Для каждой линии варьировались четыре параметра: интенсивность, сдвиг линии, столкновительная полуширина, параметр сужения Дикке. Доплеровская часть ширины линии фиксировалась и рассчитывалась по формуле (4).

В результате обработки контуров линий поглощения паров воды были получены значения интенсивностей линий (табл.2), которые для более сильной линии с  $\nu = 7185.597$  см<sup>-1</sup> в пределах погрешностей измерения совпадают с результатами других авторов. Для линии с  $\nu = 7185.394$  см<sup>-1</sup> измеренная интенсивность превышает результаты цитируемых работ. Возможно, это связано с тем, что в этих работах дополнительно анализируется линия с  $\nu = 7185.400$  см<sup>-1</sup>, и ее интенсивность равняется  $2.7 \times 10^{-3}$  см<sup>-2</sup>·атм<sup>-1</sup>, т.е. различие интенсивностей также составляет  $\sim 10^{-3}$ .

Табл.2. Интенсивности линий дублета H<sub>2</sub>O, полученные в настоящей и других работах.

Переход	S <sub>0</sub> (10 <sup>-3</sup> см <sup>-2</sup> ·атм <sup>-1</sup> )			
	Настоящая работа	[4]	[18]	[7]
6 <sub>60</sub> ←6 <sub>61</sub> *** 7185.597 см <sup>-1</sup>	19.2(6)	19.5(3)	20(1)	18.8(4)
5 <sub>23</sub> ←6 <sub>16</sub> *** 7185.394 см <sup>-1</sup>	15.1(2)×10 <sup>-1</sup>	13.1(6)×10 <sup>-1</sup>	13(1)×10 <sup>-1</sup>	11(1)×10 <sup>-1</sup>

\* В действительности эта линия является неразрешенным K<sub>a</sub>-дублетом двух линий 6<sub>60</sub>←6<sub>61</sub> (сильная) и 6<sub>61</sub>←6<sub>60</sub> (слабая) с расщеплением менее 0.001 см<sup>-1</sup>. Приведенная в таблице интенсивность из работы [4] является суммарной интенсивностью этих двух линий. \*\* Еще одна линия с  $\nu = 7185.575$  см<sup>-1</sup>, соответствующая переходу 6<sub>16</sub>←5<sub>23</sub> колебательной ветви (200)←(000), была зафиксирована в работе [4] с интенсивностью  $0.3 \times 10^{-3}$  см<sup>-2</sup> атм<sup>-1</sup>. \*\*\* Этот переход принадлежит колебательной ветви (200)←(000), а остальные переходы – ветви (101)←(000).

При помощи зарегистрированных в исследуемом диапазоне экспериментальных спектров поглощения паров воды была проведена оценка ширины линии генерации ДЛ ( $\gamma_{\text{gen}}$ ), обусловленная флуктуациями частоты излучения. Процедура определения ширины линии генерации состояла в подгонке узкой, доплеровской линии поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  контуром  $\text{Re}(W(x,y))$  (2) и в нахождении лоренцевской компоненты  $\gamma_L$ . Доплеровская часть ширины линии  $\gamma_D$  ( $\text{см}^{-1}$ ) при этом должна совпадать со своим теоретическим значением при данной температуре газа. В результате подгонки было получено  $\gamma_{\text{gen}} = 0.00016(1) \text{ см}^{-1}$  (5.3 МГц), что хорошо согласуется с данными для ширины линии генерации ДЛ с распределенной обратной связью.

## 5. Уширение и сдвиг линий дублета воды $\text{H}_2^{16}\text{O}$ в диапазоне частот 7184–7186 $\text{см}^{-1}$

Для исследования уширения и сдвига линий в дублете использовались следующие буферные газы:  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Xe}$ , воздух. Вакуумированный баллон емкостью 5 л обезгаживался до остаточного давления 3–5 мбар. Далее в

него напускались пары воды естественного изотопного состава при температуре 23°C. Давление паров воды в баллоне контролировалось датчиком давления Elemer и составляло 13–17 мбар. После этого в баллон напускался буферный газ до давления 1 атм и смесь оставлялась для перемешивания на сутки. Для регистрации спектров поглощения паров воды в соответствии с описанной выше процедурой использовалась кювета длиной 2 м.

На рис.8 представлены экспериментальные спектры поглощения паров воды в смесях с различными буферными газами при разных давлениях. Видно, что как уширение, так и сдвиг (величина и направление) линий поглощения зависят от сорта буферного газа.

Подгонка спектров осуществлялась с использованием модели «hard-collision», подробно описанной выше. Процедура записи спектров состояла из следующих этапов. После откачки аналитической кюветы до остаточного давления  $1.3 \times 10^{-2}$  мбар прописывалась и сохранялась базовая линия, потом в кювету запускалась проба газовой смеси, давление которой непрерывно контролировалось датчиком давления Elemer. Проводилась процедура по-

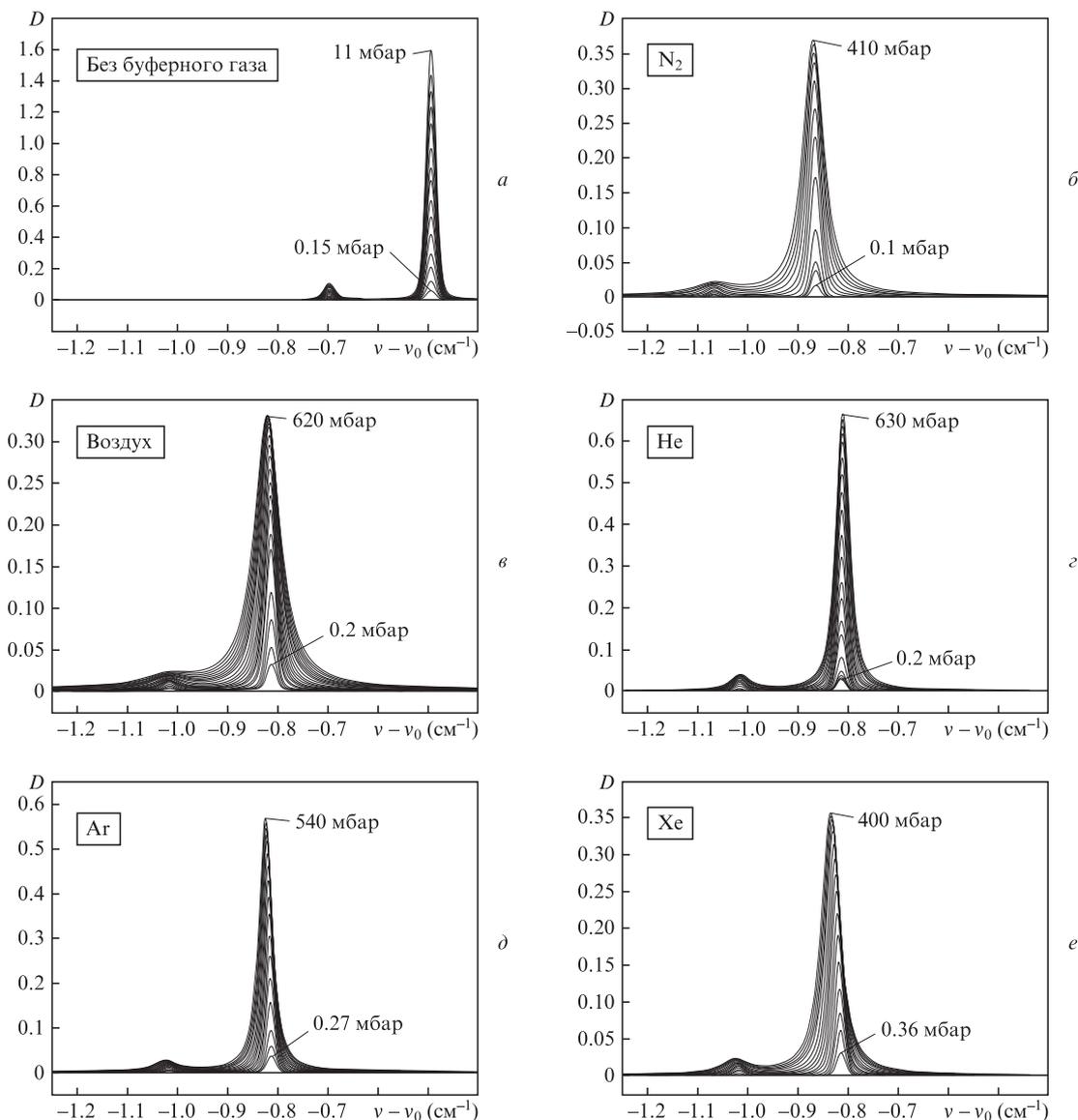


Рис.8. Спектры поглощения паров воды в отсутствие буферного газа (а) и в смесях с азотом (б), воздухом (в), гелием (з), аргоном (д), ксеноном (е); длина кюветы 2 м.

Табл.3. Параметры линии с  $\nu_0 = 7185.597 \text{ см}^{-1}$  дублета полосы  $\nu_1 + \nu_3$  молекул  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  при столкновениях с молекулами различных газов.

Буферный газ	$\delta^0 (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1})$	$\gamma^0 (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1})$		$\zeta^0 (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1})$		Концентрация $\text{H}_2\text{O}$ в смеси (%)
		Настоящая работа	[4]	Настоящая работа	[4]	
$\text{H}_2\text{O}$	0.012(4)	$2.02(2) \times 10^{-1}$	$2.30(2) \times 10^{-1}$	$4.2(2) \times 10^{-2}$	—	100
He	$4.81(9) \times 10^{-3}$	$1.76(2) \times 10^{-2}$	$1.42(9) \times 10^{-2}$	$8.7(4) \times 10^{-3}$	$6(2) \times 10^{-3}$	1.26
$\text{N}_2$	$-1.24(1) \times 10^{-2}$	$5.0(2) \times 10^{-2}$	$4.69(5) \times 10^{-2}$	$2.5(2) \times 10^{-2}$	$2.4(2) \times 10^{-2}$	1.49
Воздух	$-1.362(8) \times 10^{-2}$	$4.37(4) \times 10^{-2}$	—	$2.14(4) \times 10^{-2}$	—	0.5
Ar	$-2.18(1) \times 10^{-2}$	$2.20(2) \times 10^{-2}$	$1.92(4) \times 10^{-2}$	$3.4(4) \times 10^{-2}$	$3.0(2) \times 10^{-2}$	1.24
Xe	$-5.28(4) \times 10^{-2}$	$4.5(1) \times 10^{-2}$	—	$3.2(3) \times 10^{-2}$	—	1.47

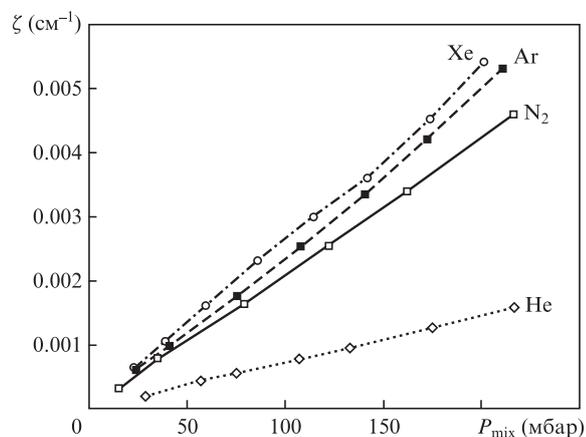
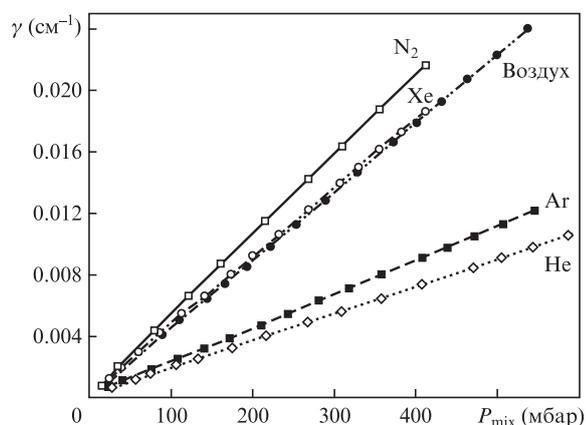
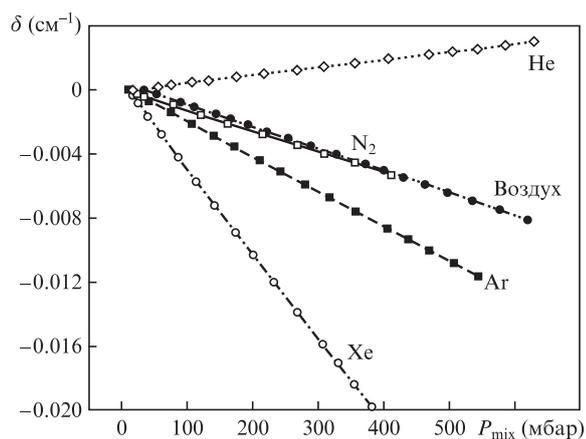


Рис.9. Экспериментальные зависимости параметров сдвига линии (а), столкновительного уширения (б) и сужения Дикке (в) от давления газовых смесей паров воды с различными буферными газами.

лучения оптической плотности  $D$  из закона Бугера–Ламберта–Бера [21] и накопления этой величины по 128 выборкам. Результаты записывались в память компьютера и в дальнейшем обрабатывались с использованием процедур подгонки экспериментальных данных известными модельными функциями.

Таким образом были получены зависимости от давления газовой смеси параметров столкновительного уширения, сдвига линии и сужения для линий дублета при уширении различными буферными газами. Эти зависимости представлены на рис.9.

В табл.3 даны коэффициенты уширения, сдвига и сужения, полученные в результате обработки контуров линий, а также концентрации водяного пара в исследуемой газовой смеси.

При уширении ксеноном и аргоном наблюдалась асимметрия контура линии (рис. 8, д, е), которая не учитывается контуром Раутиана–Собельмана. По всей видимости, эффект асимметрии обусловлен дополнительной, не учитываемой нами, корреляцией подгоночных параметров уширения и сдвига, а также их зависимостью от относительной скорости сталкивающихся молекул [22, 23].

## 6. Выводы

1. Создан двухканальный ДЛС для исследования спектров поглощения паров  $\text{H}_2\text{O}$  в ближнем ИК диапазоне.
2. Разработаны программы управления ДЛС и обработки спектров (линеаризация, нахождение центров и интенсивностей линий).
3. Учтено влияние аппаратной функции ДЛ, приводящее к искажению контура спектральной линии поглощения. Определена ширина линии генерации ДЛ из подгонки доплеровски уширенных линий  $\text{H}_2\text{O}$  теоретическими конурами в диапазоне  $7184\text{--}7186 \text{ см}^{-1}$ .
4. Измерены интенсивности линий поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  в диапазоне частот  $7184\text{--}7186 \text{ см}^{-1}$ . Проведено их сравнение с результатами других исследований и данными из базы данных HITRAN-2008.
5. Получены коэффициенты уширения, сдвига и сужения линий поглощения молекул  $\text{H}_2\text{O}$  в диапазоне частот  $7184\text{--}7186 \text{ см}^{-1}$  при их столкновениях с молекулами различных буферных газов. Зарегистрирован эффект асимметрии контура линии поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  при ее уширении аргоном и ксеноном.

1. Zobov N.F., Shirin S.V., Ovsyannikov R.I., Polyansky O.L., Barber R.J., Tennyson J., et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **387**, 1093 (2008).
2. Liu A.W., Naumenko O., Song K.F., Voronin B., Hu S.M. *J. Mol. Spectrosc.*, **236**, 127 (2006).
3. Liu A., Naumenko O., Kassi S., Campargue A. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **110**, 1781 (2009).

4. Lepère M., Henry A., Valentin A., Camy-Peyret C. *J. Mol. Spectrosc.*, **208** (1), 25 (2001).
5. Toth R.A. *Appl. Opt.*, **33**, 4851 (1994).
6. Toth R.A., Flaud J.M., Camy-Peyret C. *J. Mol. Spectrosc.*, **67**, 206 (1977).
7. Toth R.A. *Appl. Opt.*, **33**, 4868 (1994).
8. Toth R.A. *J. Mol. Spectrosc.*, **186**, 66 (1997).
9. Leshchishina O., Mikhailenko S., Mondelain D., Kassi S., Campargue A. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, **113**, 2155 (2012).
10. Macko P., Romanini D., Mikhailenko S.N., Naumenko O.V., Kassi S., Jenouvrier A., et al. *J. Mol. Spectrosc.*, **227**, 90 (2004).
11. Toth R.A., Margolis J.S. *J. Mol. Spectrosc.*, **55**, 229 (1975).
12. <http://www.elemer.ru>.
13. <http://www.bdsensors.ru>.
14. <http://jp.hamamatsu.com>.
15. <http://ni.com>.
16. Allan D. *Proc. IEEE*, **54** (2), 221 (1966).
17. Заславский В.Я., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я., Чернин С.М. *Квантовая электроника*, **41** (1), 81 (2011).
18. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>.
19. Раутиан С.Г., Собельман И.И. *УФН*, **90**, 701 (1966).
20. Кузьмичев А.С., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. *Квантовая электроника*, **41** (7), 650 (2011).
21. Бугер П. *Оптический трактат о градации света* (М.: Изд-во АН СССР, 1950).
22. Galatry L. *Phys. Rev.*, **122**, 1218 (1961).
23. Ciurylo R., Pine A.S., Szudy J. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **68**, 257 (2001).