

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРА ОБЕРТОННОЙ ЛИНИИ HF, УШИРЕННОЙ Ar, Xe, Kr, N₂, МЕТОДОМ ДИОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Я. Я. Понуровский¹, С. В. Иванов², Ш. Ш. Набиев³, В. М. Семенов⁴

Методом диодной лазерной спектроскопии ближневидного ИК-диапазона экспериментально исследован контур обертонной колебательно-вращательной линии поглощения 0-2 R(0) молекулы HF в смесях с Ar, Xe, Kr, N₂. Определены коэффициенты ударного уширения, сдвига и столкновительного сужения линии HF в указанных буферных газах с использованием контуров Фойгта, Раутана и Галатри. При этом показано наличие асимметрии контура линии, неучтенное в указанных моделях.

Ключевые слова: молекула HF, диодная лазерная спектроскопия, контур обертонной колебательно-вращательной линии, коэффициенты уширения и сдвига.

Введение. В последние годы весьма актуальной становится защита окружающей среды от загрязнений, связанных с крупномасштабными авариями на объектах ядерного топливного цикла (ЯТЦ), сопровождающимися выбросами (утечками) высокотоксичных соединений и аэрозолей, которые образуются в процессе переработки ядерного топлива, утилизации оружейного урана и плутония и т.д. [1]. Одним из наиболее опасных компонентов аварийных выбросов на объектах ЯТЦ является летучий UF₆, представляющий собой наиболее химически активное соединение из всех известных фторсодержащих соединений урана [2]. Выброс UF₆ сопровождается его гидролизом по схеме:

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ponur1960@yandex.ru.

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, 142190 Троицк, Моск. обл., ул. Пионерская, 2; e-mail: serg.ivanov.home@mail.ru.

³ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Курчатова, 1; e-mail: Nabiev_SS@nrcki.ru.

⁴ Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, 111250 Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14; e-mail: semenov.v.m@gmail.ru.

$\text{UF}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$ и, как следствие, резким повышением в атмосфере концентрации фтористого водорода.

Еще одним мощным источником эмиссии HF в атмосферу являются химические, металлургические (например, алюминиевые) производства, а также объекты электронной, оптической промышленности и др. [3, 4].

Химически агрессивные фториды, в особенности HF, присутствующие в выбросах перечисленных выше производств, опасны для всей земной флоры и фауны [4, 5]. Отравляющее действие HF сильнее действия других кислотогенных газов (хлора, оксидов азота, диоксида серы, оксидов углерода и др.) до 3000 раз [6]. Так, HF в сочетании с другими поллютантами (например, SO_2 , Cl_2 , HCl и др.) резко усиливает токсическое влияние на древесные растения, при этом воздействие такого загрязнения особенно опасно для хвойных лесов [4, 7].

Поэтому задачи оперативного контроля за выбросами фтористого водорода и других токсичных веществ [8] вблизи объектов атомной, химической, электронной, металлургической и др. промышленности, оценка состояния зеленых массивов, в частности лесов, приобретают важную социальную значимость как необходимый аспект индикации среды обитания человека [9]. Кроме того, методы оперативного контроля концентрации HF в атмосфере имеют все возрастающее значение для получения информации о несанкционированной МАГАТЭ деятельности с использованием делящихся материалов, а также противодействия различным проявлениям (в т.ч. ядерным) террористической деятельности [10].

Одним из наиболее перспективных лазерно-оптических методов контроля атмосферы является метод диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) [11, 12]. Он характеризуется дистанционностью (до нескольких километров), высокой концентрационной чувствительностью (доли ppbV) и быстрой получения информации в реальном режиме времени (доли секунд), что особенно важно с точки зрения мониторинга атмосферы вблизи объектов ЯТЦ [13–15].

В настоящее время все практические процедуры определения концентраций подавляющего большинства загрязняющих веществ в атмосфере базируются на предположении о фойгтовской форме аналитической линии [16] и использовании различных баз спектральных данных [17–19], в т.ч. базы данных HITRAN [20], которая наиболее часто применяется при количественном газовом анализе. В то же время уже более 40 лет известно, что реальный контур изолированной линии вблизи ее центра заметно отличается от фойгтовского. Однако лишь в последние 15–20 лет при измерениях столк-

новительного уширения линий стали использоваться более совершенные спектроскопические модели. К их числу относятся контуры Галатри [21] и Раутиана–Собельмана [22], которые учитывают эффект Дике [23] уменьшения допплеровского уширения из-за столкновительного ограничения свободного движения активных (поглощающих) молекул. Другим механизмом, также приводящим к сужению линии, является зависимость столкновительной ширины от абсолютной скорости активной молекулы. Соответствующие формы линии описываются зависящими от скорости контурами Фойгта и Галатри. Применение более совершенных спектроскопических моделей при обработке эксперимента указало на необходимость коррекции коэффициентов ударного уширения линий, содержащихся в базах спектральных данных.

Линия 0-2 R(0) HF, на наш взгляд, является наиболее удобной аналитической линией для спектроскопического детектирования HF в условиях реальной атмосферы [13]. Именно поэтому данная линия была выбрана для исследований в настоящей работе. Информация о спектроскопических параметрах линии 0-2 R(0) HF представлена в базе данных HITRAN 2008 [20]. В настоящее время в базе отсутствуют данные о коэффициенте ударного сдвига δ этой линии в воздухе. Кроме того, для этой линии характерна достаточно высокая погрешность определения основных спектральных параметров.

Несомненный интерес с точки зрения практических приложений представляет исследование контуров линий HF в смеси с основными атмосферными газами (N_2 , O_2), а также с малыми газовыми составляющими атмосферы (H_2O , CO_2 , CH_4 и др.). В то же время исследования более простых смесей молекул HF, например, с различными благородными газами (Ar, Kr, Xe), дают неоценимую информацию, позволяющую выяснить физические механизмы формирования контуров химически агрессивных газов. В дальнейшем эта информация может помочь созданию физически обоснованных моделей и способствовать пониманию процессов спектроскопического проявления межмолекулярных взаимодействий в более сложных (многокомпонентных) смесях. Именно поэтому в данной статье мы сделали акцент на исследование смесей HF с Ar, Kr, Xe. Из атмосферных газов выбран лишь N_2 .

Методика эксперимента. Для исследования контуров линии поглощения в различных буферных газах была разработана экспериментальная установка, включающая в себя двухканальный диодный лазерный спектрометр и вакуумный стенд.

Вакуумный стенд, предназначенный для подготовки образцов газовых смесей, был изготовлен из нержавеющей стали. Он включал в себя: сосуды для хранения F_2 , HF, Ar, Kr, Xe, N_2 , ресивер, сосуды для приготовления газовых смесей, датчики измерения

давления ELEMER [24]. Уплотнения всех составляющих стенда были выполнены из фторопласта 4-МБ, обладающего высокой химической стойкостью. Оптические кюветы присоединялись к стенду посредством сильфона, изготовленного из нержавеющей стали. Внутренние поверхности стенда и кювет пассивировались сначала газообразным фтором, а затем HF при давлениях 5–10 мм рт. ст.

Используемый в экспериментах фтористый водород (класс чистоты 99.93) подвергался тщательной осушке, степень которой контролировалась по полосам поглощения в ИК-спектрах в области валентных колебаний воды с использованием специальной кюветы с регулируемой толщиной [25]. В качестве буферных газов применялись Ar, Kr, Xe, N₂ особой чистоты (класс чистоты 99.999). Перед началом экспериментов проводилась их дополнительная осушка путем пропускания газов через колонны, заполненные цеолитами различных марок, KOH и P₂O₅. Степень осушки каждого газа контролировалась с использованием ИК криоспектроскопической методики, описанной в [26].

Для проведения экспериментов были приготовлены газовые смеси HF:Ar=1:150, HF:Kr=1:260, HF:N₂=1:1170, HF:Xe=1:290 (по объему). Для приготовления каждой смеси в емкость объемом $V = 2$ л запускался чистый HF, а затем нагнетался до $P = 2 - 3$ атм соответствующий буферный газ до получения указанных соотношений концентраций. Перед проведением эксперимента смесь оставалась в сосуде в течение суток для оптимального перемешивания. Запись спектров осуществлялась в диапазоне давлений $P = 4.5 - 750$ мм рт. ст.

На рис. 1 представлена блок-схема двухканального спектрометра. Спектрометр включал в себя лазерный модуль, волоконно-оптический делитель, аналитический и референтный каналы, фотоприемные устройства (ФД) с предусилителями (ПУ), электронный блок управления и регистрации, персональный компьютер (ПК).

В качестве источника излучения в спектрометре использовался лазерный модуль NEL NTT Electronics [27], включающий в себя диодный лазер (ДЛ) с распределенной обратной связью и волоконным выводом излучения, а также систему терморегулирования. ДЛ генерировал в окрестности длины волны $\lambda = 1.284$ мкм с шириной линии генерации 5 МГц.

При исследовании контура линии поглощения 0-2 R(0) HF перестройка частоты излучения ДЛ осуществлялась при фиксированной температуре за счет изменения тока накачки в импульсно-периодическом режиме. Импульс тока накачки имел трапециевидную форму, длительность импульса составляла 3 мс, частота повторения – 250 Гц. При средней величине тока накачки 70 мА мощность излучения ДЛ не превышала 15 мВт.

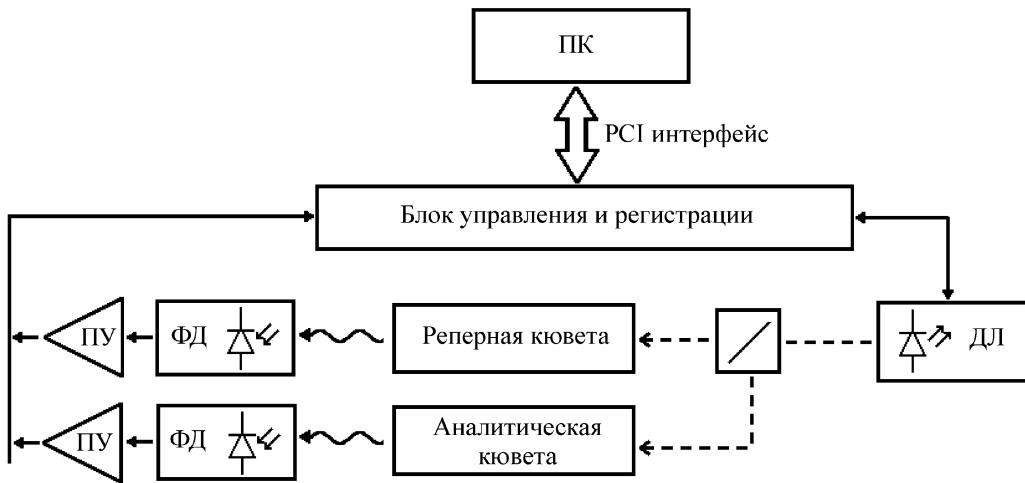


Рис. 1: Блок-схема двухканального диодного лазерного спектрометра для исследования спектров поглощения HF в ближнем ИК-диапазоне: ДЛ – лазерный модуль, ФД – фотодиоды, ПУ – предусилители, ПК – персональный компьютер.

Частотная перестройка ДЛ в этих условиях достигала 1.0 см^{-1} . Система термостабилизации обеспечивала стабильность температуры кристалла ДЛ на уровне 10^{-4} К в диапазоне её изменения от 278 до 313 К.

Оптические кюветы в аналитическом и реперном каналах имели длину 200 мм, диаметр 30 мм и были изготовлены из нержавеющей стали. В качестве окон кювет использовались пластинки из CaF_2 диаметром 40 мм, имеющие клин 1.5% для минимизации интерференции лазерного излучения в оптических каналах. Аналитическая кювета заполнялась исследуемой газовой смесью, а реперная – чистым HF при давлении 0.3 мм рт. ст.

Реперный канал использовался для дополнительной температурной стабилизации ДЛ по линии поглощения HF и для абсолютной частотной калибровки спектров. Градуировка частотной шкалы осуществлялась с помощью эталона Фабри–Перо, область свободной дисперсии которого в диапазоне генерации ДЛ составляла 0.04925 см^{-1} .

В качестве фотоприемников использовались InGaAs фотодиоды фирмы “Hamamatsu” с обнаружительной способностью $D^* = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$ и хорошей линейностью по интенсивности [28].

Электронный блок управления и регистрации состоял из многофункциональной платы ЦАП/АЦП NI DAQ 6052-E фирмы National Instruments [29], источников тока на качки ДЛ и термоэлемента Пельтье.

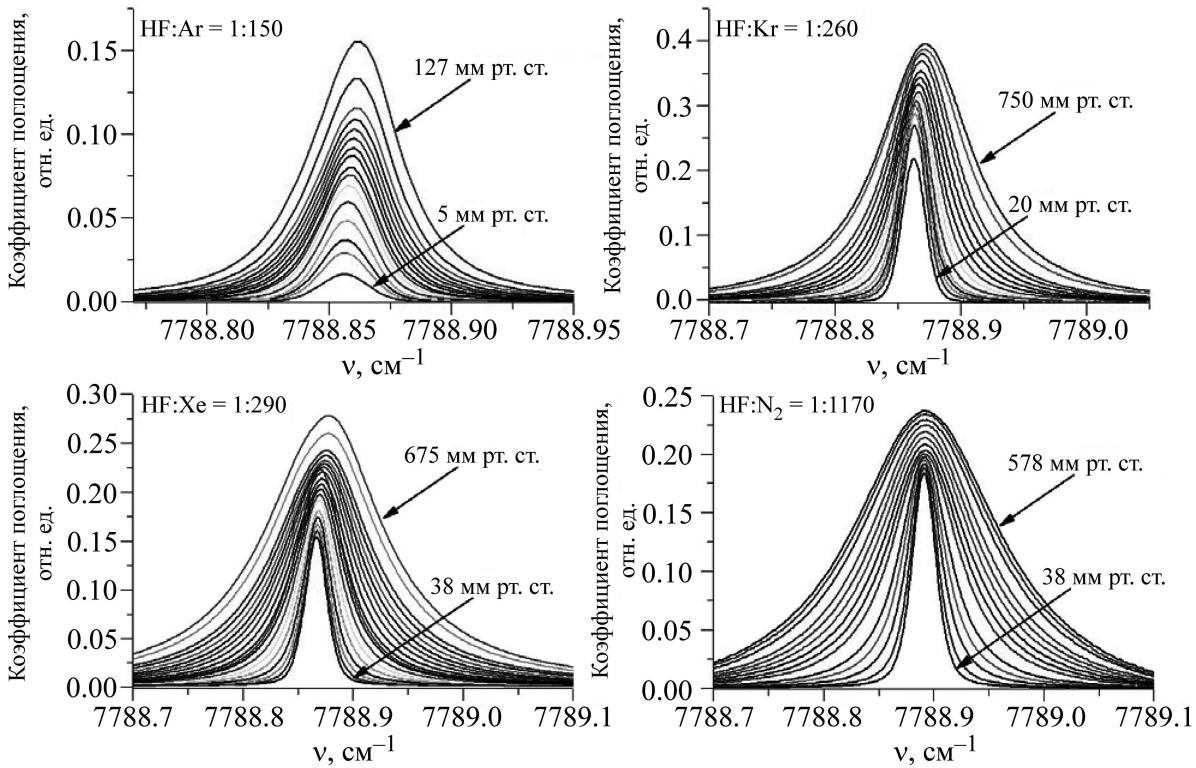


Рис. 2: Экспериментальные контуры линии поглощения 0-2 $R(0)$ HF, уширенной различными буферными газами ($T = 295$ K).

Экспериментальные результаты. На рис. 2 представлены экспериментальные контуры линии 0-2 $R(0)$ HF в газовых смесях $\text{HF:Ar}=1:150$, $\text{HF:Kr}=1:260$, $\text{HF:N}_2=1:1170$, $\text{HF:Xe}=1:290$, записанные в диапазоне давлений $P = 5 - 750$ мм рт. ст. Из рис. 2 следует, что для всех исследованных уширяющих газов наблюдается сдвиг $\Delta\nu_0$ центра линии 0-2 $R(0)$ HF с ростом давления газовой смеси. Зависимость $\Delta\nu_0$ от давления исследованных газовых смесей представлена на рис. 3.

Из рис. 3 можно определить коэффициент сдвига δ линии 0-2 $R(0)$ HF в различных буферных газах: для HF-Ar $\delta_{\text{Ar}} = 0.01383 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ [30], для HF-Kr $\delta_{\text{Kr}} = 0.013 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$, для HF-Xe $\delta_{\text{Xe}} = 0.0094 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$, для HF-N_2 $\delta_{\text{N}_2} = 0.0018 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$.

Для определения коэффициентов ударного уширения, сужения, а также получения информации об асимметрии контура использовалась процедура аппроксимации измеренных спектров с помощью контуров Фойгта, Раутиана и Галатри. В процедуре аппроксимации использовался оптимизированный нелинейный метод наименьших

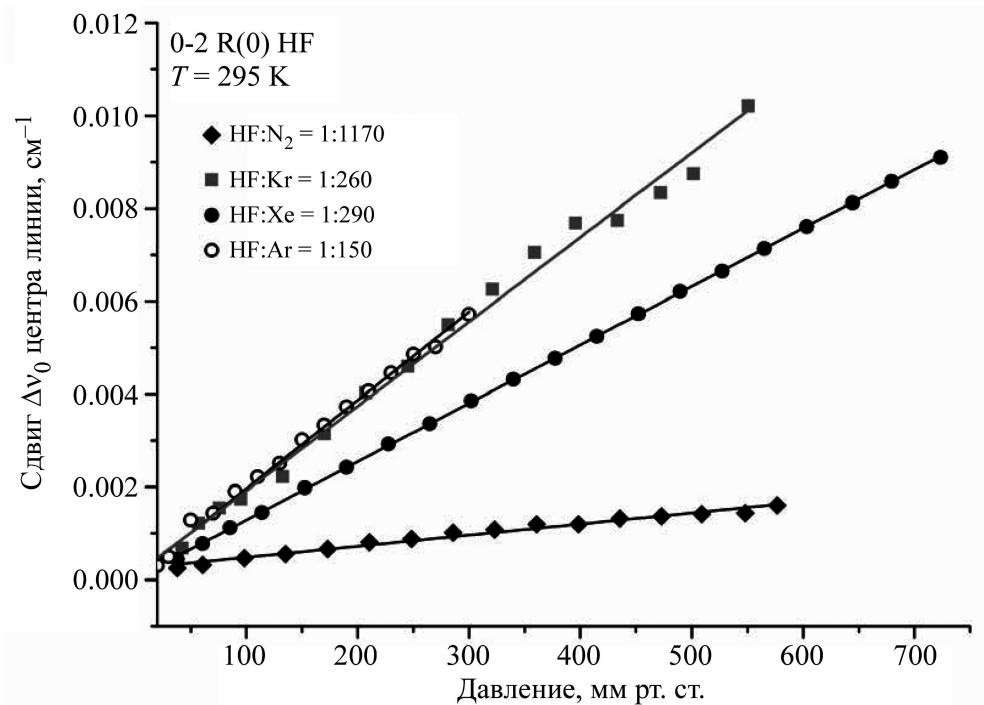


Рис. 3: Зависимость сдвига линии $0-2\ R(0)$ HF в различных уширяющих газах от полного давления смеси.

квадратов Левенберга–Маркардта [31]. По результатам аппроксимации определялась величина ударной полуширины линии Г (половина ширины линии по половине ее максимума интенсивности) и величина столкновительного сужения B (при аппроксимации контурами Раутиана и Галатри). Пример аппроксимации спектра газовой смеси HF:Xe при давлении $P_{\text{HF-Xe}} = 113$ мм рт. ст. представлен на рис. 4. Из рис. 4 видно, что контуры Раутиана и Галатри дают близкие значения точности аппроксимации. Невязка (разность эксперимент – модельный контур ($\mathcal{E}-M$)) при аппроксимации контуром Фойгта заметно хуже. Кроме того, невязка обладает заметной асимметрией относительно сдвинутого центра линии, что свидетельствует об асимметрии контура. Асимметрия контура линии обнаружена во всех благородных газах. В случае N₂ контур практически симметричен.

При обработке экспериментальных спектров не учитывалась конечная ширина линии генерации ДЛ [30]. Полуширина аппаратной функции ДЛ была оценена по результатам аппроксимации линии $0-2\ R(0)$ чистого HF контуром Фойгта при давлении 0.24 мм рт. ст. и составила величину $\Gamma_a = 1.6 \cdot 10^{-4}\ \text{см}^{-1}$, что соответствует ширине линии генерации ДЛ 5.3 МГц. При этом доплеровская полуширина составляла величи-

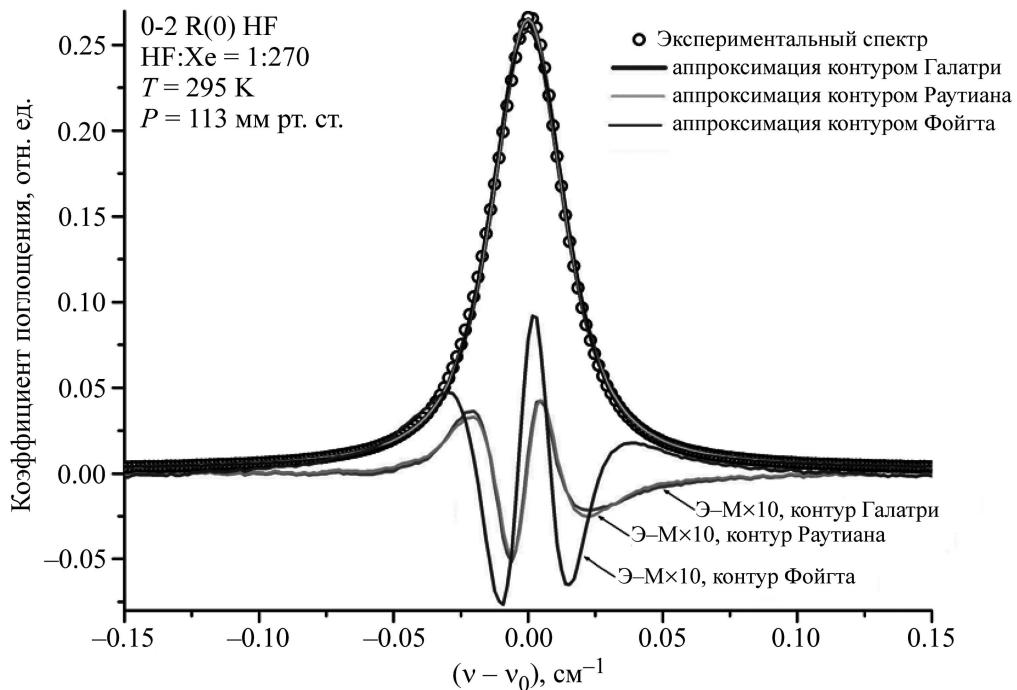


Рис. 4: Пример аппроксимации экспериментального контура линии поглощения 0-2 $R(0)$ HF в смеси HF:Xe контурами Галатри, Раутиана и Фойгта. В нижней части рисунка приведена разность экспериментальный – модельный ($\mathcal{E}-M$) контур.

ну $\Gamma_d = 0.01071 \text{ см}^{-1}$, что хорошо согласуется с расчетным значением. Таким образом, полуширина аппаратной функции $\Gamma_a = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ значительно меньше полуширины линии HF при давлениях газовой смеси $P > 40 \text{ мм рт. ст.}$ В то же время неучет конечной ширины линии генерации ДЛ при малых давлениях может приводить к кажущейся нелинейной зависимости сдвига от давления.

На рис. 5 представлены зависимости ударной полуширины Γ на полувысоте линии 0-2 $R(0)$ HF в различных уширяющих газах от давления смесей при аппроксимации контуром Раутиана. Коэффициент уширения в различных буферных газах может быть определен из рис. 5 линейной аппроксимацией. При использовании контуров Раутиана и Галатри коэффициенты уширения в различных буферных газах оказываются примерно одинаковыми и равными: для HF-Ar $\gamma_{\text{Ar}} = 0.038 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [23], для HF-Kr $\gamma_{\text{Kr}} = 0.061 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, для HF-Xe $\gamma_{\text{Xe}} = 0.0709 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, для HF-N₂ $\gamma_{\text{N}_2} = 0.103 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. В случае аппроксимации контуром Фойгта, значения коэффициентов уширения оказываются примерно на 5% ниже, чем при аппроксимации контурами Галатри и Раутиана.

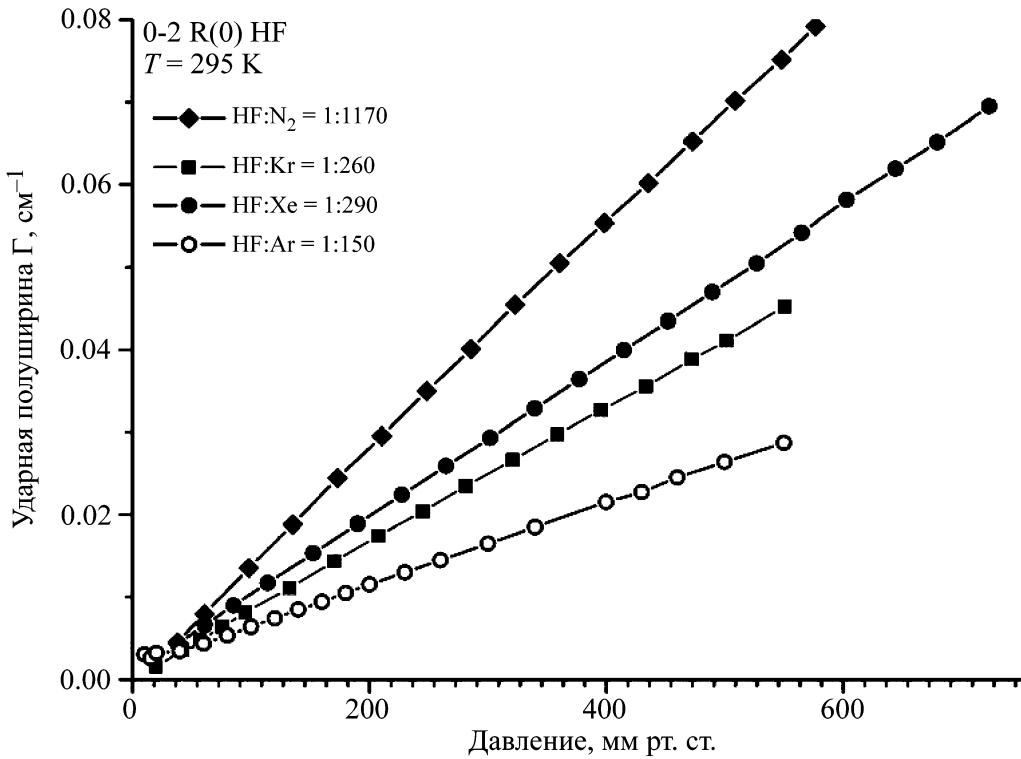


Рис. 5: Зависимость ударной ширины γ линии $0-2 R(0)$ HF в различных уширяющих газах от давления (аппроксимация контуром Раутиана).

Представленный в HITRAN 2008 [20] коэффициент уширения в воздухе γ_{air} основан на измерениях коэффициента уширения в N_2 и получен путем умножения последнего на 0.9. Это позволяет сопоставить полученный нами коэффициент уширения с HITRAN. На основе наших данных значение γ_{air} составляет $0.936 \text{ см}^{-1}\text{атм}^{-1}$, что несколько выше ($\sim 9\%$), приведенного в HITRAN. Это отличие лежит в пределах погрешности HITRAN 2008.

Столкновительное сужение B определялось аналогично уширению. Полученные зависимости этой величины от давления $B(P)$ представлены на рис. 6. Соответствующие величины параметров сужения равны: для HF-Ar $\beta_{\text{Ar}} = 0.0216 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ [30], для HF-Kr $\beta_{\text{Kr}} = 0.028 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$, для HF-Xe $\beta_{\text{Xe}} = 0.058 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$, для HF-N₂ $\beta_{\text{N}_2} = 0.048 \text{ см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$. Значения спектроскопических параметров, полученных по результатам аппроксимации контурами Галатри и Раутиана, отличаются менее чем на 0.5%.

Найденные из экспериментальных контуров значения спектроскопических параметров δ , γ , β для смесей HF:Ar, HF:Kr, HF:Xe, HF:N₂ сведены в таблицу 1.

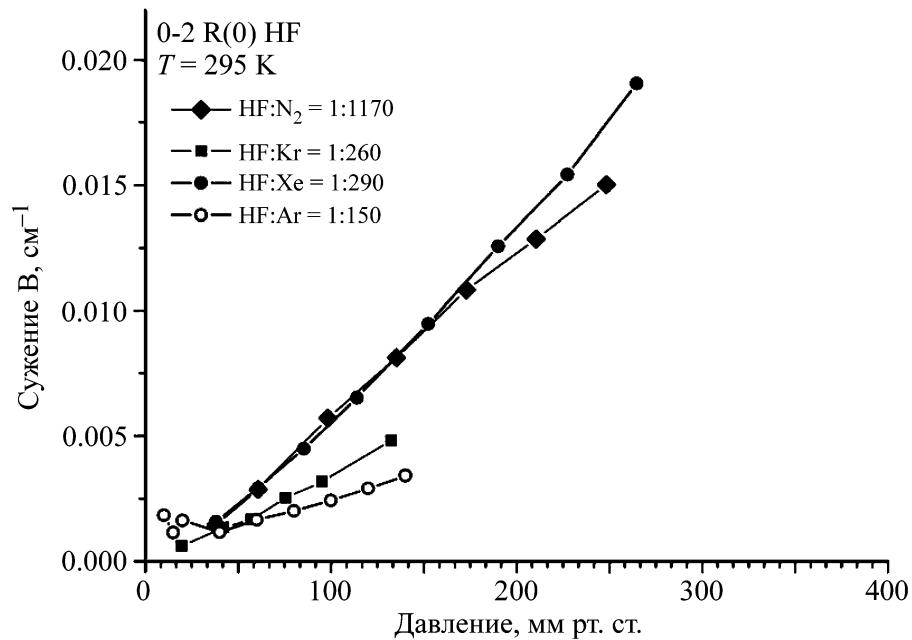


Рис. 6: Зависимость параметра сужения β линии $0-2 R(0)$ HF в различных уширяющих газах от давления (аппроксимация контуром Раутиана).

Т а б л и ц а 1

Измеренные спектроскопические параметры линии $0-2 R(0)$ HF

Параметр	Уширяющий газ			
	Ar	Kr	Xe	N ₂
δ , $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$	0.01383	0.013	0.0094	0.0018
γ , $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$	0.038	0.061	0.0709	0.103
β , $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$	0.0216	0.028	0.058	0.048

Строго говоря, предпринятая нами попытка аппроксимации экспериментально измеренных контуров линии $0-2 R(0)$ HF симметричными модельными контурами Раутиана и Галатри, является не более чем стандартной “*ad hoc*” процедурой, маскирующей физическую картину формирования контура. Тем не менее, подобный подход без обсуждения часто применяется в экспериментальной практике (см., напр., [32]). Относительная популярность контуров Раутиана и Галатри у специалистов в области газового анализа в сравнении с контуром Фойгта при обработке экспериментальных результатов объясняется просто – они содержат два подгоночных параметра (полуширину Γ и сужение B) в то время как контур Фойгта лишь один (полуширину Γ). Контуры Раутиана и Га-

латри моделируют лишь эффект сужения допплеровского контура с ростом давления по механизму Диже. Однако есть еще явная асимметрия формы линии.

Таким образом, следует признать, что аппроксимация измеренных контуров линии HF 0-2 R(0) симметричными контурами типа Галатри и Раутиана является не совсем адекватной процедурой, которая маскирует реальные механизмы формирования контура спектральной линии и вносит неконтролируемую ошибку в коэффициент уширения.

В качестве альтернативы для экспериментальной практики газового анализа, на наш взгляд, необходимы достаточно простые контуры с небольшим числом физически ясных параметров аппроксимации. К сегодняшнему дню этим условиям в наибольшей степени удовлетворяет универсальный асимптотический контур Раутиана [33], справедливый для ситуаций, когда столкновительное уширение значительно превышает допплеровское. К сожалению, применимость этого контура в условиях нашего эксперимента ограничена диапазоном самых больших давлений (см. рис. 5).

Выводы. Методом диодной лазерной спектроскопии ближнего ИК-диапазона (длина волны ДЛ $\lambda = 1.284$ мкм, диапазон перестройки $\Delta\nu = 1.0$ см $^{-1}$) изучены контуры спектральной линии поглощения HF 0-2 R(0), уширенной различными буферными газами (Ar, Xe, Kr, N₂). Проведены измерения коэффициентов сдвига δ , уширения γ и параметров столкновительного “сужения” β этой линии в широком диапазоне давлений смесей HF:Ar, HF:Kr, HF:Xe, HF:N₂. Показано, что контуры Раутиана и Галатри дают близкие результаты при обработке формы спектральной линии HF 0-2 R(0). Точность аппроксимации оказывается заметно хуже, когда используется контур Фойгта. Коэффициенты уширения, полученные с применением контура Фойгта, оказываются более чем на 5% меньше соответствующих величин, полученных с использованием контуров Раутиана и Галатри.

Полученные значения коэффициентов сдвига и уширения линии HF 0-2 R(0) формально уточняют значения, представленные в спектроскопических базах данных, в т.ч. HITRAN-2008. Для аналитических применений это выражается в заметном увеличении точности при определении концентрации HF в воздухе в реальных условиях как в локальном, так и дистанционном вариантах мониторинга атмосферы.

Результаты данной работы – это попытка формально описать результаты измерений контурами Галатри и Раутиана. Однако экспериментальные результаты свидетельствуют не просто о сужении, а о выраженной асимметрии контура линии. Полученный “коэффициент сужения Диже”, который содержит эти модели, в нашем случае может исказяться асимметрией. Отметим также, что использованные модельные контуры вносят

ошибку и в коэффициент уширения линии. Однако при этом возникает также вопрос – что такое коэффициент уширения в случае асимметричного контура? Все это говорит о необходимости по-новому взглянуть на понятие уширения линии в случае асимметрии контура.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ш. Ш. Набиев, Ю. Н. Пономарев, Оптика атмосферы и океана **11**(12), 1274 (1998).
- [2] Химия актиноидов. Под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга, Л. Морсса (Мир, Москва, 1991).
- [3] V. C. Marshall, *Major Chemical Hazards* (Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1987).
- [4] R. Guderian, *Air Pollution: Phytotoxicity of Acidic Gases and Its Significance in Air Pollution Control* (Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1977).
- [5] L. H. Weinstein, Al. Davison, *Fluorides in the Environment: Effects on Plants and Animals* (CABI Publ., Cambridge, 2004).
- [6] L. H. Weinstein, A. W. Davison, Environ. Pollut. **125**(1), 3 (2003).
- [7] A. S. Rozhkov, T. A. Mikhailova, *The Effects of Fluorine-Containing Emissions on Conifers* (Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1993).
- [8] Г. Ю. Григорьев, С. Л. Малюгин, Ш. Ш. Набиев и др., Атомная энергия **105**(4), 217 (2008).
- [9] N. Zvereva, S. Ignatov, Sh. Nabiev, et al., in *Proceedings of Intern. Symp. on Atmospheric Radiation (ISAR-99)* (Sankt-Petersburg, Russia, 1999), p. 127.
- [10] <http://www.iaea.org/newscenter/features/nuclearsecurity/terrorism.html/>
- [11] A. I. Nadezhinskii, A. M. Prokhorov, Proc. SPIE **1724**, 2 (1992).
- [12] M. W. Sigrist, R. Bartlome, D. Marinov, et al., Appl. Phys. B **90**(2), 289 (2008).
- [13] G. Yu. Grigoriev, S. L. Malyugin, Sh. Sh. Nabiev, et al., Appl. Phys. B **101**(3), 683 (2010).
- [14] Г. Ю. Григорьев, Ш. Ш. Набиев, А. И. Надеждинский и др., Перспективные материалы № 8, 75 (2010).
- [15] S. V. Ivanov, Sh. Sh. Nabiev, Ya. Ya. Ponurovskii, in *Proceedings of 7-th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS-2009)* (Zermatt, Switzerland, 2009), p. 79.

- [16] J.-M. Hartmann, C. Boulet, D. Robert, *Collisional effects on molecular spectra: laboratory experiments and models, consequences for applications* (Elsevier Science, Amsterdam, 2008).
- [17] N. Jacquinet-Husson, N. A. Scott, A. Chedin, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **109**, 1043 (2008).
- [18] <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/>
- [19] <http://spectra.iao.ru/>
- [20] L. Rothman, I. Gordon, A. Barbe, et al., J. Quant. Spectr. Radiat. Trans. **110**(9-10), 533 (2009).
- [21] L. Galatry, Phys. Rev. **122**(4), 1218 (1961).
- [22] С. Г. Раутиан, И. И. Собельман, УФН **90**(2), 209 (1966).
- [23] R. H. Dicke, Phys. Rev. **89**(2), 472 (1953).
- [24] <http://www.elemer.ru>
- [25] Sh. Sh. Nabiev, Spectrochim. Acta **56A**(8), 1589 (2000).
- [26] Sh. Sh. Nabiev, V. D. Klimov, Molecular Physics **81**(2), 395 (1994).
- [27] <http://www.ntt-electronics.com/en/>
- [28] <http://jp.hamamatsu.com/>
- [29] <http://ni.com>
- [30] III. III. Набиев, С. В. Иванов, Я. Я. Понуровский, Оптика атмосферы и океана **24**(10), 864 (2011).
- [31] J. Nocedal, S. J. Wright, *Numerical Optimization* (Springer, New York, 1999).
- [32] S.-I. Chou, D. S. Baer, R. K. Hanson, J. Molec. Spectrosc. **196**(1), 70 (1999).
- [33] С. Г. Раутиан, Опт. и спектр. **90**(1), 36 (2001).

Поступила в редакцию 18 февраля 2013 г.