

Измерения коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения воды в области 8650–9020 см⁻¹ давлением атмосферных газов

Т.М. Петрова, А.М. Солодов, А.А. Солодов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 17.03.2010 г.

Проведены измерения коэффициентов уширения и сдвига центров более чем 100 линий поглощения H₂O с буферными газами O₂ и N₂. Данные о коэффициентах уширения и сдвига линий получены из анализа спектров поглощения, зарегистрированных с помощью Фурье-спектрометра в спектральном диапазоне 8650–9020 см⁻¹ со спектральным разрешением 0,01 см⁻¹. Показано, что для более точного определения коэффициентов сдвига необходимо учитывать вклад близкорасположенных линий с интенсивностью даже на 2 порядка меньше измеряемой линии. Для всех буферных газов наблюдалась линейная зависимость величины сдвига от давления.

Ключевые слова: коэффициент сдвига центра линий поглощения, Фурье-спектрометр, водяной пар; lines shifts coefficient, Fourier spectrometer, water vapor.

Введение

Детальное знание колебательно-вращательных спектров поглощения молекулы воды и ее основных изотопных модификаций необходимо для решения задач спектроскопии атмосферы. Для решения задач распространения оптического излучения в атмосфере важны измерения не только параметров спектральных линий, таких как положение центра линии, ее интенсивность и полуширина, но и коэффициентов сдвига колебательно-вращательных линий в ближней ИК-области давлением атмосферных газов. Основными характеристиками линий являются коэффициенты уширения и сдвига спектральных линий совместно с интенсивностью линии и ее центром.

В работе [1] было показано, что при использовании лазеров с узкой линией излучения и спектральных приборов высокого разрешения для зондирования газового состава атмосферы необходимо учитывать сдвиг центра линии поглощения в колебательно-вращательном спектре, вызванный давлением воздуха.

Кроме того, сдвиг более чувствителен к структуре потенциала межмолекулярных взаимодействий, чем полуширина, и, следовательно, представляет особый интерес при изучении специфики столкновений молекул, так как может быть использован при восстановлении параметров потенциала межмолекулярного взаимодействия [2].

В настоящее время большое количество работ посвящено исследованию коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения молекулы воды давлением различных газов (см., например, [3, 4] и ссылки в них). Сдвиг линий водяного пара измерялся Фурье-спектрометрами [5–10], диодными лазерными спектрометрами [11–15], оптико-акустическими спектрометрами [16] методами микроволновой спектроскопии [17, 18] и лазерной фотометрии [19–22]. Измерения проводились с высоким спектральным разрешением в широких спектральных диапазонах.

В работах [3, 23–25] представлены расчеты коэффициентов сдвига линий водяного пара давлением различных буферных газов. Численными методами изучена температурная и колебательная зависимость, влияние различных внутримолекулярных эффектов, разработаны методики массовых расчетов. Таким образом, к настоящему времени получен большой массив данных о коэффициентах сдвига линий H₂O.

Для ближней ИК-области 8650–9000 см⁻¹ существует только одна работа [26], в которой с помощью Фурье-спектрометра зарегистрированы сдвиги центров наиболее сильных линий поглощения H₂O давлением азота. Это можно объяснить тем, что в данной спектральной области расположены граничные области чувствительности для Si- и InSb-фотоприемников, используемых в Фурье-спектрометрах, и большинство измерений коэффициентов уширения и сдвига проведены либо выше, либо ниже указанного диапазона.

В настоящей статье представлены экспериментальные данные о коэффициентах уширения и сдвига центров линий поглощения молекул воды в области 8650–9020 см⁻¹.

* Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Александр Михайлович Солодов (solodov@iao.ru); Александр Александрович Солодов.

Эксперимент

Измерения спектра поглощения водяного пара в области $8650\text{--}9020\text{ см}^{-1}$, уширенного давлением кислорода и азота, были выполнены в Институте оптики атмосферы СО РАН с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR. В качестве излучателя в спектрометре использовался вольфрамовый источник света, регистрация излучения осуществлялась с помощью Si- и InSb-детекторов, охлаждаемых жидким азотом. Области чувствительности этих фотоприемников попадают в диапазон $8650\text{--}9020\text{ см}^{-1}$, что позволило нам провести в этой области два независимых исследования коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения и сравнить полученные результаты. Многоходовая оптическая кювета Thermo Electron с базой 20 см, позволяющая получить длину оптического пути до 10 м, размещалась внутри кюветного отделения спектрометра. Данная модель Фурье-спектрометра имеет герметизированный корпус, который с помощью форвакуумного насоса откачивался до остаточного давления $\sim 0,02$ мбар, что значительно уменьшало влияние атмосферных газов на результаты измерений.

Для того чтобы иметь возможность проанализировать как сильные линии поглощения (интенсивность до $1 \cdot 10^{-21}$ см/мол), так и относительно слабые (интенсивность $\sim 1 \cdot 10^{-23}$ см/мол) спектры поглощения $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{O}_2$ - и $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{N}_2$ -смесей регистрировались при трех давлениях водяного пара — 1,1; 5,3 и 17 мбар. Давление буферного газа варьировалось от 0 до 1000 мбар. Измерение давления $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{O}_2$ - и $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{N}_2$ -смесей внутри кюветы производилось с помощью датчика давления DVR5. Все записи спектров поглощения были выполнены при комнатной температуре со спектральным разрешением $0,01\text{ см}^{-1}$ и оптической длине луча в кювете 10 м. На рис. 1 представлен обзорный спектр пропускания молекулы воды (давление H_2O 17 мбар, давление N_2 588 мбар).

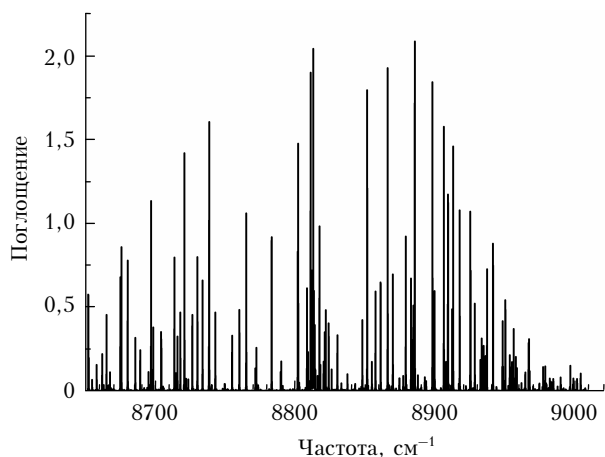


Рис. 1. Спектр поглощения H_2O в области $8650\text{--}9020\text{ см}^{-1}$ при давлении воды 17 мбар и давлении азота 588 мбар

Обработка полученных спектров поглощения производилась в два приема. На первой стадии оп-

ределялось положение центров изолированных и перекрывающихся линий поглощения водяного пара подгонкой теоретического контура к экспериментальному методу наименьших квадратов. Для аппроксимации использовался фойгтовский контур. Из результатов подгонки были получены значения положений центров и их стандартные отклонения для более чем 100 линий поглощения водяного пара при различных давлениях кислорода и азота.

На следующей стадии для каждой обработанной спектральной линии строился график зависимости положения центра линии поглощения от давления буферного газа и производилась аппроксимация этой зависимости линейной функцией. Эта последняя процедура позволяла получить значения коэффициентов сдвига центров линий H_2O , уширенных кислородом и азотом.

Нами было установлено, что для корректного определения коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения при нахождении центров необходимо учитывать все близкорасположенные линии (расстояние между линиями — несколько полуширин), даже имеющие малую интенсивность. На рис. 2а приведены две линии поглощения H_2O полосы $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ [5 2 4] — [6 2 5] и [8 1 7] — [8 3 6], их интенсивности отличаются приблизительно на 2 порядка.

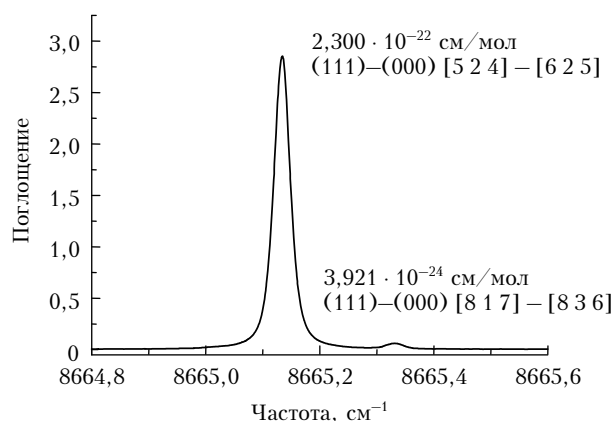


Рис. 2а. Фрагмент Фурье-спектра поглощения для близкорасположенных линий поглощения H_2O с центрами $8665,1311$ и $8665,3293\text{ см}^{-1}$, имеющих разную интенсивность

Если для определения параметров спектральной линии с центром $8665,1311\text{ см}^{-1}$ рассматривать только ее одну и не учитывать наличие слабой линии поглощения, то наблюдается отклонение от линейной зависимости сдвига центра линии поглощения от давления (рис. 2б).

Если же определять параметры всех линий одновременно, то зависимость носит линейный характер и погрешность определения коэффициента сдвига для данной линии улучшается. В высокочастотной области спектра аналогичные эффекты наблюдаются часто, и для определения правильных значения коэффициентов уширения и сдвига необходимо проанализировать исследуемый спектральный диапазон и при определении параметров линии учитывать все слабые линии поглощения.

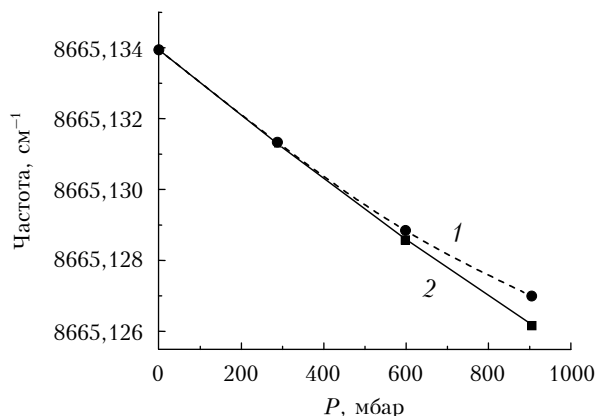


Рис. 26. Зависимость положения центра линий поглощения H_2O (111)–(000) [5 2 4] – [6 2 5] от давления азота без учета (1) и с учетом (2) слабой близкорасположенной линии поглощения

Результаты и обсуждение

В спектральной области $8650\text{--}9020\text{ см}^{-1}$ наблюдаются линии поглощения водяного пара, принадлежащие полосам $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$, $2\nu_1 + \nu_2$, $6\nu_2$, $\nu_2 + 2\nu_3$.

Наиболее сильной полосой является полоса $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$, и в основном именно для линий поглощения этой полосы были определены значения коэффициентов уширения и сдвига центров. Для всех линий величины сдвига центров линий отрицательны и изменяются в диапазоне от $-0,02$ до $-0,001\text{ см}^{-1}/\text{атм}$ для уширяющего газа азота и от $-0,025$ до $-0,009\text{ см}^{-1}/\text{атм}$ для кислорода. Сравнение коэффициентов сдвига центров линий азотом, измеренных нами и авторами [26], показало хорошее согласие, среднеквадратическое отклонение между полученными значениями составляло $0,0017\text{ см}^{-1}/\text{атм}$. При этом необходимо учитывать тот факт, что коэффициенты сдвига в [26] определялись только по двум значениям положений центров линий воды при нулевом и атмосферном давлении азота, а это увеличивает погрешность измерений. В таблице приведены измеренные значения коэффициентов сдвига линий H_2O давлением азота и кислорода для области $8898\text{--}8957\text{ см}^{-1}$, а также центры линий поглощения и их квантовая идентификация, последняя графа соответствует данным работы [26].

В отличие от коэффициентов уширения вращательная зависимость сдвигов линий носит более сложный характер, и плавные зависимости возможно

Экспериментальные значения коэффициентов уширения и сдвига линий поглощения H_2O , вызванные давлением N_2 и O_2 , в области $8898\text{--}8957\text{ см}^{-1}$

ν , см^{-1}	$V_1V_2V_3$	$J'K'_aK'_c$	$J''K''_aK''_c$	δ , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$ для O_2	Δ	γ , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$ для O_2	Δ	δ , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$ для N_2	Δ	γ , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$ для N_2	Δ	δ , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$ [26]
8898,1943	1 1 1	5 1 5	4 1 4	-0,01742	25	0,0447	7	-0,00687	28	0,0931	15	-0,0058
8899,1304	1 1 1	4 2 3	3 2 2	-0,01664	20	0,0510	5	-0,00864	46	0,0982	22	-0,0087
8899,6936	1 1 1	5 0 5	4 0 4	-0,01664	31	0,0476	8	-0,00440	14	0,0940	16	-
8906,3510	1 1 1	4 1 3	3 1 2	-0,01590	32	0,0532	5	-0,00719	44	0,1015	10	-
8909,3621	1 1 1	4 2 2	3 2 1	-0,01854	41	0,0521	5	-0,01185	51	0,0958	11	-
8912,2568	1 1 1	6 1 6	5 1 5	-0,01955	26	0,0408	7	-0,00845	7	0,0795	23	-0,0098
8912,9834	1 1 1	6 0 6	5 0 5	-0,01884	22	0,0401	4	-0,00630	23	0,0829	13	-0,0079
8917,6803	1 1 1	5 2 4	4 2 3	-0,01844	33	0,0476	4	-0,01041	40	0,0917	10	-0,0113
8925,2222	1 1 1	7 1 7	6 1 6	-0,02140	41	0,0371	10	-0,01129	33	0,0685	21	-0,0082
8928,4787	1 1 1	5 3 3	4 3 2	-0,01880	33	0,0465	4	-0,01260	20	0,0854	7	-0,0099
8932,5303	1 1 1	5 3 2	4 3 1	-0,01605	26	0,0478	4	-0,00535	21	0,0856	7	-
8933,4633	1 1 1	5 2 3	4 2 2	-0,01813	25	0,0520	4	-0,01193	38	0,1008	33	-0,0072
8934,7405	1 1 1	6 2 5	5 2 4	-0,01954	44	0,0438	6	-0,01051	27	0,0832	7	-0,012
8936,2625	1 1 1	5 4 2	4 4 1	-0,02059	33	0,0391	6	-0,00964	30	0,0745	10	-
8936,4103	1 1 1	5 4 1	4 4 0	-0,02097	51	0,0385	6	-0,00879	30	0,0747	10	-
8937,1317	1 1 1	8 1 8	7 1 7	-0,02249	33	0,0307	9	-0,01569	32	0,0525	9	-
8937,2339	1 1 1	8 0 8	7 0 7	-0,02263	34	0,0308	6	-0,01451	32	0,0542	11	-
8941,5153	1 1 1	6 1 5	5 1 4	-0,01651	23	0,0484	6	-0,00482	21	0,0936	15	-
8948,1499	1 1 1	9 0 9	8 0 8	-0,02370	33	0,0280	5	-0,01777	45	0,0444	20	-
8948,4417	1 1 1	9 1 9	8 1 8	-0,02360	41	0,0277	4	-0,01766	29	0,0455	14	-
8948,7646	1 1 1	6 3 4	5 3 3	-0,01960	33	0,0445	9	-0,01394	30	0,0834	10	-
8950,3347	1 1 1	7 2 6	6 2 5	-0,02056	25	0,0405	5	-0,01175	11	0,0753	9	-0,0133
8953,4804	1 1 1	6 2 4	5 2 3	-0,01095	24	0,0510	10	-0,00562	36	0,0956	13	-
8954,1310	0 6 0	6 1 6	5 2 3	-0,01023	44	0,0535	9	-0,00512	36	0,0950	11	-
8955,0549	1 1 1	7 1 6	6 1 5	-0,01866	33	0,0434	6	-0,00580	15	0,0855	19	-
8955,7238	1 3 0	6 5 2	5 2 3	-0,01186	34	0,0494	5	-0,00408	29	0,1056	26	-
8956,2946	1 1 1	6 3 3	5 3 2	-0,01829	24	0,0473	5	-0,01038	42	0,0892	10	-
8957,1910	1 1 1	6 4 3	5 4 2	-0,02097	23	0,0384	15	-0,01329	34	0,0677	10	-

Примечание. V_1, V_2, V_3 – колебательные квантовые числа верхнего состояния; $J'K'_aK'_c$ и $J''K''_aK''_c$ – вращательные квантовые числа верхнего и нижнего состояния соответственно; δ – коэффициенты сдвига; γ – коэффициенты уширения; Δ – среднеквадратическая ошибка в единицах $10^{-4}\text{ см}^{-1}/\text{атм}$ для коэффициентов уширения и $10^{-5}\text{ см}^{-1}/\text{атм}$ для коэффициентов сдвига. 1 атм = 1013 мбар.

найти, рассматривая только отдельные подветви. На рис. 3 представлены графики зависимостей коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения давлением азота от вращательного квантового числа нижнего состояния (000) m .

Подобные исследования проведены авторами [6]. Как и в работе [6], у нас наблюдаются плавные зависимости, с увеличением квантового числа J'' значение коэффициента сдвига увеличивается, а уширение уменьшается. Для ряда спектральных линий наблюдается отклонение от монотонных зависимостей: это линии, соответствующие переходам в полосе $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ [2 1 1] – [3 1 2], [2 1 1] – [1 1 0], [3 1 2] – [2 1 1] и [10 0 10] – [9 0 9]. Для верхних уровней данных переходов наблюдается возмущение за счет взаимодействия с соответствующими уровнями колебательного состояния (210) за счет резонанса Кориолиса [27]. В некоторых случаях перемешивание базисных волновых функций весьма большое и дает коэффициенты перемешивания, близкие к 50%.

При достаточно сильном колебательном возбуждении изгибного колебания увеличивается вклад центробежной энергии и изменяется обычное соотношение между диагональными и недиагональными матричными элементами эффективного гамильтониана. При этом проявляются резонансные взаимодействия между состояниями, принадлежащими различным полиадам. В области 8650–9020 см^{-1} межполиадные резонансы в молекуле воды связывают уровень [616]

(060), принадлежащий полиаде 3ν , с тремя уровнями колебательных состояний (111), (012), (220), принадлежащих полиаде $2\nu + \delta$ (рис. 4).

Данное резонансное взаимодействие между колебательными состояниями второй гексады и состоянием [060] было впервые отмечено в [27]. Нами были измерены коэффициенты уширения и сдвига для трех линий H_2O , уровни которых связаны НЕР-резонансом (рис. 4). Линия, принадлежащая переходу на уровень колебательного состояния (220), имеет малую интенсивность, и поэтому коэффициенты уширения и сдвига для нее не были определены. Значения коэффициентов уширения и сдвига для линии полосы $6\nu_2$ и для резонирующих с ней линий также представлены в таблице.

В широко используемых базах данных HITRAN [28] представлены данные не только о положениях центров линий поглощения, их интенсивностях и полуширинах, но приведены значения коэффициентов самоуширения, уширения и сдвига давлением воздуха. Для исследуемой нами спектральной области в базах данных имеются только рассчитанные значения коэффициентов сдвига [22], поэтому представляет интерес сравнить и дополнить измеренные значения расчетными. Поскольку экспериментальные значения для коэффициентов сдвига были получены для таких буферных газов, как азот и кислород, то для определения коэффициентов сдвига давлением воздуха использовалось хорошо известное парциальное

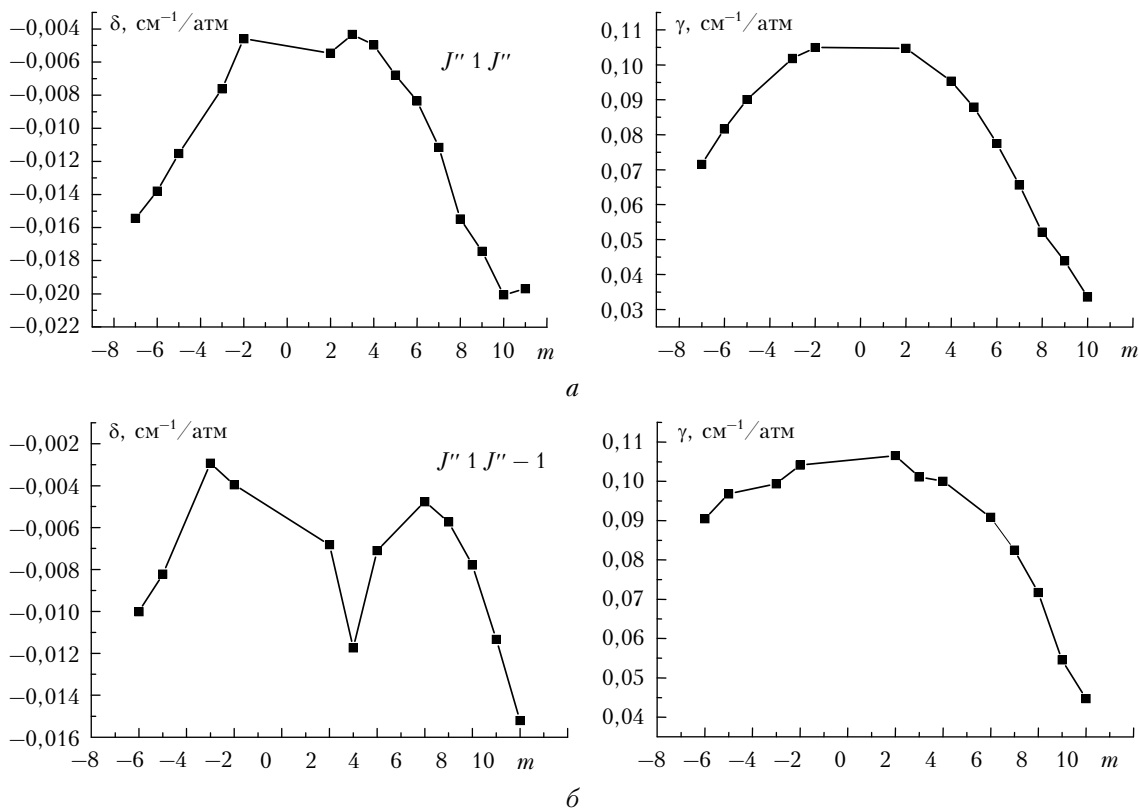


Рис. 3. Зависимости коэффициентов уширения и сдвига как функции от m , $m = J'' + 1$ для R -ветви и $m = -J''$ для P -ветви: a – для подветви $(J 1 J) \leftrightarrow (J - 1 1 J - 1)$; b – для подветви $(J 0 J - 1) \leftrightarrow (J - 1 0 J - 2)$

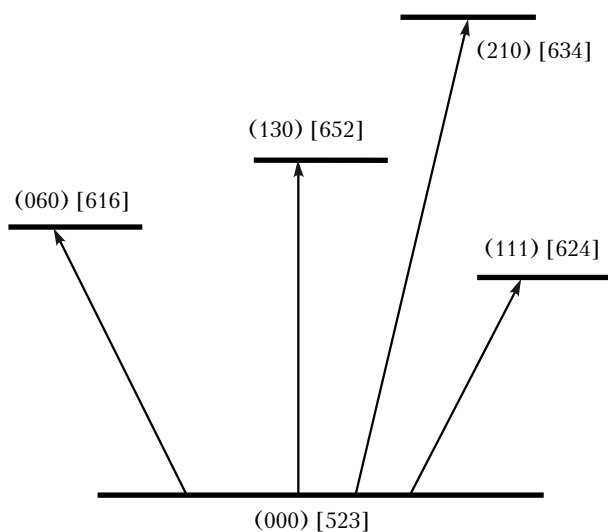


Рис. 4. Переход [060]–[000] (616)–(523) и соответствующие более сильные переходы, уровни энергии которых связаны «HEL-резонансом» (локальный резонанс высоко-возбужденных состояний)

соотношение содержания в воздухе азота и кислорода $\delta = 0,78\delta_{N_2} + 0,21\delta_{O_2}$. На рис. 5 представлены результаты сравнения.

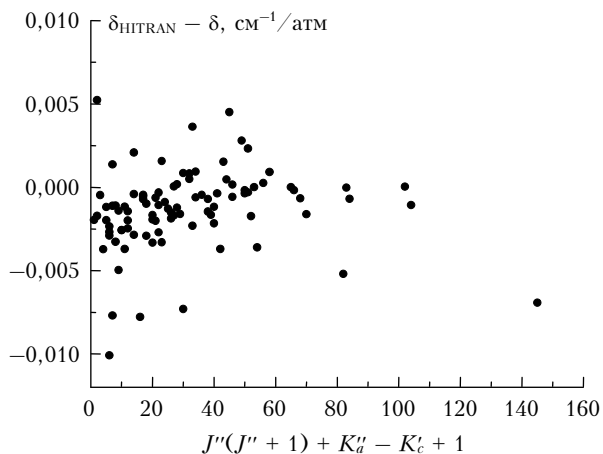


Рис. 5. Результаты сравнения коэффициентов сдвига центров линий поглощения H_2O с данными, приведенными в HITRAN [28]

Разность между экспериментально определенными коэффициентами сдвига и приведенными в базе данных HITRAN меняется в диапазоне от 0,005 до $-0,01 \text{ cm}^{-1}$, в среднем наблюдается смещение в отрицательную область.

Заключение

В данной статье представлены результаты измерений коэффициентов уширения и сдвига центров линий поглощения H_2O в области $8650\text{--}9020 \text{ cm}^{-1}$. В качестве буферных газов использовались азот и кислород. В статье показано, что коэффициенты сдвига центров линий H_2O коррелируют с коэффициентами перемешивания волновых функций состоя-

ний, связанных сильными резонансами. Это обстоятельство должно учитываться при расчете коэффициентов сдвига. Кроме того, полученные данные о коэффициентах уширения и сдвига центров линий поглощения водяного пара могут быть использованы при расчетах распространения узкополосного излучения в приземной атмосфере.

Авторы выражают благодарность Ю.Н. Пономареву и Л.Н. Синице за интерес и внимание к работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы физических наук РАН «Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее приложения», проекты III.9.3 и III.9.4.

1. Zuev V.V., Ponomarev Yu.N., Solodov A.M., Tikhomirov B.A., Romanovsky O.A. Influence of the shift H_2O absorption lines with air pressure on the accuracy of the atmospheric humidity profiles measured by differencal-absorption method // *Opt. Lett.* 1985. V. 10. N 7. P. 318–320.
2. Броуэлл Э.В., Гроссман Б.Э., Быков А.Д., Капитанов В.А., Лазарев В.В., Пономарев Ю.Н., Синица Л.Н., Коротченко Е.А., Стройнова В.Н., Тихомиров Б.А. Исследование сдвигов линий поглощения H_2O в видимой области спектра давлением воздуха // *Оптика атмосф. и океана.* 1990. Т. 3. № 7. С. 675–691.
3. Gamache R.R., Hartmann J.-M. Collisional parameters of H_2O lines: effects of vibration // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 83. N 2. P. 119–147.
4. Toth R.A. Measurements and analysis (using empirical functions for widths) of air- and self-broadening parameters of H_2O // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 94. N 1. P. 1–50.
5. Jenouvrier A., Daumont L., Régalia-Jarlot L., Tyuterev V.G., Carleer M., Vandaele A.C., Mikhailenko S., Fally S. Fourier transform measurements of water vapor line parameters in the $4200\text{--}6600 \text{ cm}^{-1}$ region // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2007. V. 105. N 2. P. 326–355.
6. Toth R.A. Measurements of positions, strengths and self-broadened widths of H_2O from 2900 to 8000 cm^{-1} : line strength analysis of the 2nd triad bands // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 94. N 1. P. 51–107.
7. Brown L., Humphrey C.M., Gamache R.R. CO_2 -broadened water in the pure rotation and v_2 fundamental regions // *J. Mol. Spectrosc.* 2007. V. 246. N 1. P. 1–21.
8. Fally S., Coheur P.-F., Carleer M., Clerbaux C., Colin R., Jenouvrier A., Merienne M.-F., Herman C., Vandaele A.C. Water vapor line broadening and shifting by air in the $26000\text{--}13000 \text{ cm}^{-1}$ region // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2003. V. 82. N 1–4. P. 119–131.
9. Merienne M.-F., Jenouvrier A., Hermans C., Vandaele A.C., Carleer M., Clerbaux C., Coheur P.-F., Colin R., Fally S., Bach M. Water vapor line parameters in the $13000\text{--}9250 \text{ cm}^{-1}$ region // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2003. V. 82. N 1–4. P. 99–117.
10. Qunjun Zou, Varanasi P. Laboratory measurement of the spectroscopic line parameters of water vapor in the $610\text{--}2100$ and $3000\text{--}4050 \text{ cm}^{-1}$ regions at lower-tropospheric temperatures // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2003. V. 82. N 1–4. P. 45–98.
11. Li H., Farooq A., Jeffries J.B., Hanson R.K. Diode laser measurements of temperature-dependent collisional-narrowing and broadening parameters of Ar-perturbed H_2O transitions at 1391.7 and 1397.8 nm // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2008. V. 109. N 1. P. 132–143.

12. *Nadezhdinskii A.I.* Diode laser spectroscopy: precise spectral line shape measurements // *Spectrochim Acta*. A. 1996. V. 52. N 8. P. 1041–1060.
13. *Hartman J.-M., Taine J., Bonamy J., Labani B., Robert D.* Collisional broadening of rotation-vibration lines for asymmetric-top molecules. II. H₂O diode laser measurements in the 400–900 K range; calculations in the 300–2000 K range // *J. Chem. Phys.* 1987. V. 86. N 1. P. 144.
14. *Zeninari V., Parvite B., Courtois D., Lavrentieva N.N., Ponomarev Yu.N., Durry G.* Pressure broadening and shift coefficients of H₂O due to perturbation by N₂, O₂, H₂, and He in the 1.39 μm region: experiment and calculations // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. N 16–17. P. 1697–1607.
15. *Bandyopadhyay A., Ray B., Ghosh P.N., Niles D.L., Gamache R.R.* Diode laser spectroscopic measurements and theoretical calculations of line parameters of nitrogen-broadened water vapor overtone transitions in the 818–834 nm wavelength region // *J. Mol. Spectrosc.* 2007. V. 242. N 1. P. 10–16.
16. *Быков А.Д., Лазарев В.В., Пономарев Ю.Н., Стройнова В.Н., Тихомиров Б.А.* Сдвиги линии поглощения H₂O в полосе ν₁ + 3ν₃, индуцированные давлением благородных газов // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7. № 9. С. 1207–1219.
17. *Koshelev M.A., Tretyakov M.Yu., Golubiatnikov G.Yu., Parshin V.V., Markov V.N., Koval I.A.* Broadening and shifting of the 321-, 325-, and 380-GHz lines of water vapor by pressure of atmospheric gases // *J. Mol. Spectrosc.* 2007. V. 241. N 1. P. 101–108.
18. *Golubiatnikov G.Yu., Koshelev M.A., Krupnov A.F.* Pressure shift and broadening of 1₁₀–1₀₁ water vapor lines by atmosphere gases // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 2008. V. 109. N 10. P. 1828–1833.
19. *Grossman B.E., Browell E.V.* Spectroscopy of water vapor in the 720-nm wavelength region: Line strengths, self-induced pressure broadenings and shifts, and temperature dependence of linewidths and shifts // *J. Mol. Spectrosc.* 1989. V. 136. N 2. P. 264–294.
20. *Grossman B.E., Browell E.V.* Water-vapor line broadening and shifting by air, nitrogen, oxygen, and argon in the 720-nm wavelength region // *J. Mol. Spectrosc.* 1989. V. 138. N 2. P. 562–595.
21. *Grossman B.E., Browell E.V.* Line-shape asymmetry of water vapor absorption lines in the 720-nm wavelength region // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 1991. V. 45. N 6. P. 339–348.
22. *Grossman B.E., Browell E.V.* Measurements of H₂¹⁶O Linestrengths and Air-Induced Broadenings and Shifts in the 815-nm Spectral Region // *J. Mol. Spectrosc.* 1997. V. 185. N 1. P. 58–70.
23. *Jacquemart D., Gamache R.R., Rothman L.S.* Semi-empirical calculation of air-broadened half-widths and air pressure-induced frequency shifts of water-vapor absorption lines // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 2005. N 2. V. 96. P. 205–239.
24. *Antony B., Gamache P., Szembek C., Niles D., Gamache R.R.* Modified complex Robert–Bonamy formalism calculations for strong to weak interacting systems // *Mol. Phys.* 2006. V. 104. N 16–17. P. 2791–2799.
25. *Bykov A., Lavrentieva N., Sinitza L.* Semi-empiric approach to the calculation of H₂O and CO₂ line broadening and shifting // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. N 14–15. P. 1653–1658.
26. *Chevillard J.-P., Mandin J.-Y., Flaud J.-M., Camy-Peyret C.* Measurement of nitrogen-shifting coefficients of water-vapor lines between 5000 and 10700 cm⁻¹ // *Can. J. Phys.* 1991. V. 69. N 11. P. 1286–1297.
27. *Mandin J.-Y., Chevillard J.P., Flaud J.-M., Camy-Peyret C.* H₂¹⁶O: Line positions and intensities between 8000 and 9500 cm⁻¹: the second hexad of interacting vibrational states: {(050), (130), (031), (210), (111), (012)} // *Can. J. Phys.* 1988. V. 66. N 11. P. 997–1011.
28. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Šimečkova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwer J.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 2009. V. 110. N 9–10. P. 533–572.

T.M. Petrova, A.M. Solodov, A.A. Solodov. **Measurements of water vapor line shift in 8650–9020 cm⁻¹ region by pressure of atmospheric gases.**

High resolution measurements of the N₂- and O₂-broadening and shifting coefficients for more than 100 H₂O absorption lines have been performed. The data have been obtained from the analysis of the absorption spectrum, recorded at the room temperature using the Fourier spectrometer IFS 125 HR in 8650–9020 cm⁻¹ spectral region with a spectral resolution of 0.01 cm⁻¹. It is shown that for more exact definition of the line shift coefficients it is necessary to take into account the contribution of all neighbouring lines with the intensity of two orders of magnitude less than the measured line. For each buffer gas a linear relationship of line shifts was measured.