

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 539.194

Исследования спектра поглощения водяного пара в видимой области от 19480 до 20500 см^{-1}

Л.Н. Сеница, В.И. Сердюков, Е.Р. Половцева,
А.Д. Быков, А.П. Щербаков*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 14.09.2017 г.

Проведены измерения и анализ колебательно-вращательного спектра поглощения водяного пара в видимой области от 19480 до 20500 см^{-1} на Фурье-спектрометре IFS-125M с разрешением 0,05 см^{-1} при давлении 26,3 мбар, температуре $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ и длине оптического пути 24 м. Для измерений использовались кювета с базовой длиной 60 см и оптическая система Уайта. В качестве источника излучения применялся светодиод. Отношение сигнал-шум составило 20000. В результате анализа спектра был получен список из более чем 420 линий, содержащий центры, интенсивности и квантовую колебательно-вращательную идентификацию. С использованием полученной экспериментальной информации были определены более 220 колебательно-вращательных уровней энергии 21 верхнего колебательного состояния.

Ключевые слова: Фурье-спектроскопия, поглощение водяного пара, видимый диапазон, параметры спектральных линий, уровни энергии; Fourier transform spectroscopy, absorption of water vapor, visible spectral range, parameters of spectral lines, energy levels.

Введение

Исследования спектров поглощения водяного пара представляют значительный интерес для изучения атмосфер Земли, планет Солнечной системы, а также экзопланет [1]. Для них требуется детальное знание параметров спектральных линий в широкой области: от микроволновой до видимой и ближней УФ-областей. Информация о спектрах поглощения молекулы воды необходима для технических приложений: лазерной физики, исследования спектров пламени, получения сверхчистых веществ и др. Колебательно-вращательные спектры дают ценную информацию о потенциальной функции, поляризуемости, функции дипольного момента, а также внутри-молекулярной динамике молекулы воды [2].

В настоящей работе представлены результаты анализа спектра поглощения высокого разрешения водяного пара в видимой области от 19480 до 20500 см^{-1} , зарегистрированного методом светодиодной Фурье-спектроскопии. Исследования поглощения водяного пара в видимой области проводились начиная с 1933 г., когда впервые были зарегистрированы линии H_2O в солнечном спектре в области 1560–17495 см^{-1} [3]. В одной из первых публикаций [4], посвященной поглощению в видимой области,

был исследован диапазон 16908–16758 см^{-1} оптико-акустическим методом с использованием лазера на красителе. В результате было идентифицировано 282 линии водяного пара, принадлежащие трем полосам: $4\nu_1 + \nu_3$, $3\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$, $3\nu_1 + 2\nu_3$. Погрешность измерения центров линий лазерным спектрометром составила $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Анализ спектра выполнялся в рамках метода эффективных вращательных операторов. Экспериментальные исследования в видимом диапазоне проводились также методом Фурье-спектроскопии [5]: были измерены центры 1174 линий H_2O с погрешностью $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и интенсивности 630 линий с погрешностью от 5 до 35%. В [6, 7] спектр поглощения водяного пара измерялся в широком спектральном диапазоне, также с помощью Фурье-спектроскопии. В более поздней работе [7] был исследован диапазон 9250–25232 см^{-1} и составлен список линий, включающий более чем 15000 переходов на 150 колебательных состояний.

В рамках международного проекта The International Union of Pure and Applied Chemistry были собраны и проанализированы все экспериментальные данные по частотам переходов молекулы H_2O ; с высокой точностью определены значения колебательно-вращательных уровней энергии [8], которые использовались в нашей работе как вторичные стандарты частоты. На сегодняшний день проведены высокоточные расчеты центров и интенсивностей спектральных линий H_2^{16}O во всем оптическом диапазоне. Вся имеющаяся информация по поглощению водяного пара в видимой области занесена в спектроскопические банки данных HITRAN [9], GEISA [10],

* Леонид Никифорович Сеница (sln@iao.ru); Виктор Иванович Сердюков (serd49@mail.ru); Александр Дмитриевич Быков (adbykov@rambler.ru); Елена Рудольфовна Половцева (polovceva.e@mail.ru); Анатолий Петрович Щербаков (molnija2@inbox.ru).

Spectra [11] а также в информационную систему W@DIS [12]. Теперь необходимы систематическая проверка и сравнение как результатов измерений, так и теоретических расчетов.

Цель настоящей работы — уточнение спектральных параметров линий $H_2^{16}O$ в видимом диапазоне 19480–20500 cm^{-1} .

1. Эксперимент и обработка данных

Для регистрации спектра в исследуемой области был использован метод светодиодной Фурье-спектроскопии, позволяющий проводить высокочувствительные измерения при небольшой длине оптического пути [13, 14]. В качестве источника излучения применялся светодиод CREE XPE AMB. Измерения проводились на Фурье-спектрометре Bruker IFS-125M с разрешением 0,05 cm^{-1} . Используемый нами мобильный вариант спектрометра при длительных измерениях требует регулярной подстройки. Качество настройки спектрометра обычно оценивается при регистрации линий поглощения газов с узкими доплеровскими контурами, при этом измеряется аппаратная функция спектрометра. Критериями правильной юстировки спектрометра (совпадение оптических осей интерферометра и светового пучка, а также симметричность светового пучка) выступают соответствие регистрируемого инструментального контура и расчетной аппаратной функции (*sinc*-функции), а также соответствие полуширины регистрируемой линии выбранному разрешению. Особенно это касается малоинтенсивных боковых пиков, которые наиболее информативны при настройке спектрометра.

Набор газов, используемых для тестирования настройки спектрометра в видимом диапазоне спектра, невелик. Фактически это только пары йода. Для получения спектров поглощения паров йода с хорошим отношением сигнал-шум (S/N), по которым можно судить о качестве настройки спектрометра, необходимо не менее 2 ч.

В настоящей работе критерием точности настройки Фурье-спектрометра во время длительной регистрации спектров поглощения паров воды был выбран инструментальный контур узких линий излучения неона. Спектр излучения неона хорошо изучен. В [15] мы предложили использовать этот спектр для коррекции частотной шкалы спектрометра в видимой области спектра. Ширина линий излучения неона составляет $\sim 0,1 cm^{-1}$. Время регистрации таких линий с прямоугольной функцией аподизации при разрешении 0,02 cm^{-1} и приемлемом отношении $S/N \approx 20$ составляет 5 мин. Следовательно, время, требуемое для подстройки спектрометра, сокращается в несколько десятков раз. Это позволило нам проводить длительные измерения при постоянном контроле аппаратной функции спектрометра.

Спектральная яркость светодиода CREE XPE AMB в исследуемой области в 100 раз превышает яркость теплового источника (галогеновой лампы), что дает возможность на два порядка увеличить отношение S/N в измерениях. В результате принятых мер $S/N \approx 20000$ при 40 проходах излучения в многоходовой кювете с базой 60 см.

Измерения проводились в термостабилизированном помещении при постоянной температуре $(24 \pm 1) ^\circ C$, что позволило избежать ошибок, связанных с суточными вариациями температуры. Ниже приведены условия эксперимента.

Источник излучения	CREE XPE AMB
Спектральный диапазон	19480–20500 cm^{-1}
Спектральное разрешение	0,05 cm^{-1}
Функция аподизации	прямоугольная
Длина оптического пути	2400 см
Давление	26,3 мбар
Температура	$(24 \pm 1) ^\circ C$
Время измерений	9 сут
Отношение сигнал-шум	20000

На рис. 1 показан измеренный спектр пропускания водяного пара в исследуемом диапазоне. На врезке в качестве примера представлен более подробный спектр в узком спектральном диапазоне 19545–19525 cm^{-1} , содержащем очень слабые линии.

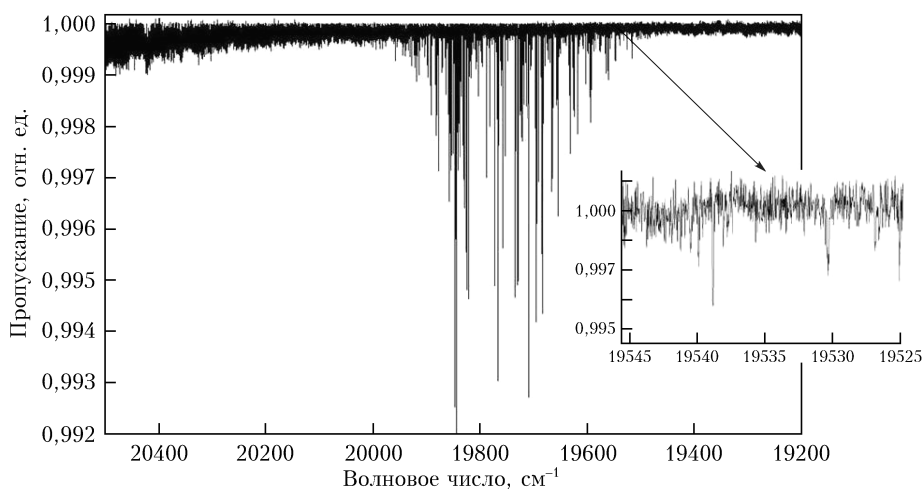


Рис. 1. Спектр пропускания водяного пара в области от 19480 до 20500 cm^{-1}

Видно, что пропускание на линиях поглощения водяного пара, зарегистрированных в этом диапазоне, составляет величину $\sim 0,996$.

Для анализа спектра была использована программа Wxspе [16], позволяющая обрабатывать спектр в автоматическом режиме. С помощью данной программы определены центры, интенсивности и полуширины линий. При подгонке учитывалась аппаратная функция прямоугольного вида с шириной $0,05 \text{ см}^{-1}$. Для каждого спектрального параметра находились доверительные интервалы. В качестве модельного контура был выбран контур Фойгта. Для слабых линий, когда уровень шума сравним с полезным сигналом, центры и интенсивности оценивались «вручную» по положению максимумов линий (в этом случае погрешность определения интенсивности может достигать 100%). Для калибровки центров полученных спектральных линий были использованы данные из работы [8]. В итоге методом наименьших квадратов была определена калибровочная константа $1,000000395$. Интенсивности линий в ходе обработки спектра сравнивались с расчетными данными [17], для которых погрешность расчета составляет 5–10%, а также с экспериментальными данными из [7].

Экспериментальная погрешность наших измерений центров линий составляет не больше $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ для сильных линий, а для слабых линий с интенсивностями меньше $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{атм}^{-1}$ погрешность измерения не превышает $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

2. Результаты и обсуждение

Поглощение водяного пара в исследуемой области формируется главным образом переходами на верхние колебательные состояния (501) и (301), а также состояния, связанные с ними резонансными взаимодействиями. Нам удалось проанализировать переходы на 21 верхнее колебательное состояние. Отнесение линий проводилось с использованием данных из работы [8]. В результате анализа спектра в области от 19480 до 20500 см^{-1} было идентифицировано 427 линий с интенсивностями от $2,8 \cdot 10^{-8}$ до $8,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \cdot \text{атм}^{-1}$.

В табл. 1 представлены основные данные, полученные из анализа спектра: количество линий для каждого колебательного состояния, максимальные и минимальные частоты переходов, диапазоны значений интенсивностей, количество измеренных уровней энергии.

Параметры спектральных линий мы сравнивали с расчетными и экспериментальными данными других авторов. В [8] расчетные центры линий определялись в результате соответствующей теоретической обработки, так что данные, приведенные в табл. 1, являются наилучшими на сегодняшний день значениями.

На рис. 2 сравниваются центры линий из нашей работы с расчетными значениями из [8]. Видно, что максимальное отклонение для центров линий не превышает $0,035 \text{ см}^{-1}$. Для 310 переходов

Таблица 1

Результаты обработки спектра H_2O в области $19480\text{--}20500 \text{ см}^{-1}$

$v_1 v_2 v_3$	Число линий	Частота, см^{-1}		Интенсивность, $\text{см}^{-2} \cdot \text{атм}^{-1}$		Число уровней энергии
		min	max	min	max	
5 0 1	149	19487,7440	20358,7650	2,82E-08	1,61E-05	59
6 0 0	134	19526,5539	19939,6863	3,95E-08	1,65E-05	63
3 4 1	65	19506,6145	20030,7560	7,90E-08	3,28E-06	29
1 8 1	4	19598,3905	19965,3724	1,25E-07	2,18E-06	2
4 4 0	31	19539,9163	19965,3724	1,26E-08	1,93E-06	20
3 6 0	6	19603,2130	19937,9233	7,98E-08	5,60E-07	4
2 6 1	8	19591,4168	19995,2436	1,75E-07	3,34E-06	3
0 6 3	4	19798,1746	19852,2672	2,37E-07	1,42E-06	2
4 2 1	18	19749,0439	19937,6414	1,16E-07	1,00E-06	11
0 9 2	3	19707,8722	19813,0342	3,03E-07	8,35E-07	2
2 8 0	2	19658,0019	19851,3933	8,66E-08	2,26E-07	1
5 2 0	21	19694,5571	20001,3645	7,20E-08	1,18E-06	13
2 9 0	1	19718,6884	19718,6884	7,23E-08	7,23E-08	1
1 1 4	2	19989,1081	19989,1081	3,87E-07	3,87E-07	2
1 5 2	1	19838,2053	19838,2053	1,78E-07	1,78E-07	1
3 3 1	1	19859,4186	19859,4186	5,75E-07	5,75E-07	1
2 1 3	1	19859,8993	19859,8993	2,36E-07	2,36E-07	1
0 1 5	1	19888,2897	19888,2897	4,86E-07	4,86E-07	1
0 8 2	2	19902,7823	19902,9185	8,57E-07	9,04E-07	2
0 5 3	1	19966,6746	19966,6746	2,37E-07	2,37E-07	1
3 0 3	6	20445,2575	20495,4460	3,61E-07	1,14E-06	5

Примечание. $v = (v_1 v_2 v_3)$ — колебательные квантовые числа верхнего колебательного состояния; нижнее колебательное состояние — (000) для всех переходов.

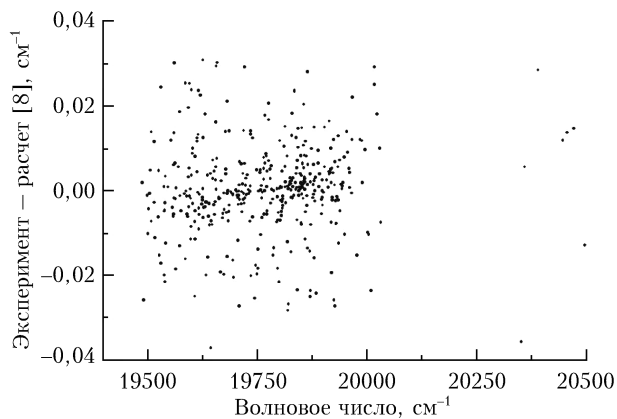


Рис. 2. Сравнение экспериментальных центров линий, измеренных в нашей работе, с расчетными центрами линий из [8]

отклонения наших центров от расчетных $\leq 0,01 \text{ см}^{-1}$, для 12 переходов $> 0,02 \text{ см}^{-1}$. Среднеквадратичное отклонение измеренных центров линий от расчетных значений [8] составляет $0,0057 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 показано отношение интенсивностей линий, измеренных в нашей работе, к экспериментальным значениям из [7]. Видно, что результаты наших измерений весьма хорошо согласуются с экспериментальными данными [7]: среднее отношение наших интенсивностей к интенсивностям [7] равно $1,26 \pm 0,67$.

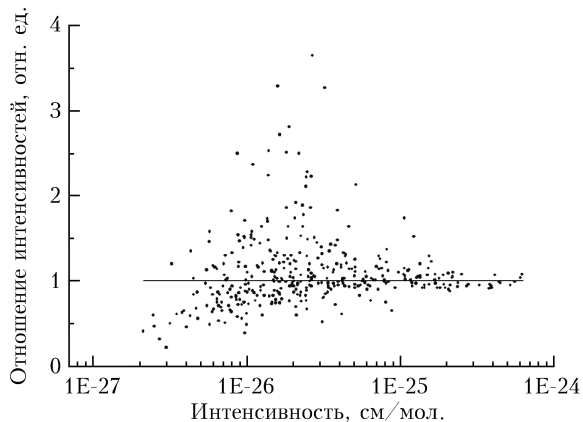


Рис. 3. Сравнение интенсивностей линий, измеренных в нашей работе, с экспериментальными значениями интенсивностей из [7]

Для сильных линий с интенсивностью $> 1 \cdot 10^{-25} \text{ см/мол.}$ среднее отношение измеренных нами интенсивностей линий к расчетным значениям [17] составило $1,0095 \pm 0,22$; среднее отношение всех экспериментальных интенсивностей линий к расчетным [17] – $1,20 \pm 0,69$. Такое отклонение можно объяснить тем, что для слабых линий разница между экспериментальными и расчетными значениями может быть значительно больше, чем для сильных линий. В целом можно заключить, что наши результаты и данные публикаций [7, 17] согласуются в пределах ошибок измерений.

Из полученного нами экспериментального списка четыре линии молекулы H_2O отсутствуют во всех имеющихся спектроскопических банках данных (например, HITRAN). Сравнение с работами других авторов показало, что эти линии были зарегистрированы также в [7]; это подтверждает достоверность их отнесения к молекуле водяного пара. В табл. 2 представлены центры и интенсивности вышеупомянутых экспериментальных линий, измеренных в нашей работе и в [7].

Таблица 2

Сравнение параметров спектральных линий из нашей работы, отсутствующих в базе данных HITRAN, с данными [7]

Частота, см^{-1}		Интенсивность, см/мол.	
Наша работа	[7]	Наша работа	[7]
19643,0199	19643,0189	4,12E-27	4,80E-27
19759,9765	19759,9782	9,64E-27	5,64E-27
19761,2707	19761,2711	4,57E-26	4,32E-26
19819,4204	19819,4488	8,29E-27	6,00E-27

На основе полученных экспериментальных данных мы определили 224 уровня энергии для 21 колебательного состояния с максимальными значениями вращательных квантовых чисел $J = 10$, $K_a = 8$. Для анализа спектра применялась программа СЛОН [18], основанная на методе распознавания образов, позволяющая идентифицировать спектр и определять уровни энергии. Идентификация линий проводится с использованием комбинационного правила Ридберга–Рица для групп линий, а также отнесения по одной линии на основе точного расчета. В табл. 1 указано количество экспериментальных уровней энергии для каждого колебательного состояния, полученных в результате обработки спектра.

Нужно отметить, что идентификация спектра проводилась с использованием приближенных колебательных (ν_1, ν_2, ν_3) и вращательных (K_a, K_c) квантовых чисел в обозначениях нормальных мод. В случае сильных резонансных взаимодействий такой подход может давать неопределенность в квантовой идентификации колебательных состояний. Так, например, резонанс Дарлинг–Деннисона связывает состояния $|v_1 v_2 v_3\rangle$ и $|v_1 \pm 2v_2 v_3 \pm 2\rangle$ вследствие близости частот нормальных колебаний ω_1 и ω_3 , и можно видеть, что переходы полосы $4\nu_1 + 2\nu_3$ в публикации [5] отнесены в [8] к полосе $6\nu_1$; полоса $5\nu_1 + \nu_3$ в [8] была идентифицирована как $3\nu_1 + 3\nu_3$ в [5]. Переходы, отнесенные к полосе $4\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$ в [5], приписаны полосе $3\nu_1 + 4\nu_2 + \nu_3$ в [8]; в этом случае имеет место резонанс Ферми между состояниями $|v_1 v_2 v_3\rangle$ и $|v_1 + 1v_2 - 2v_3\rangle$. При возрастании возбуждения колебательных квантов симметричного и антисимметричного валентных колебаний в некоторых случаях правильнее проводить идентификацию колебательно-вращательных уровней, используя квантовые числа модели локальных мод.

Заклучение

В результате исследования спектра поглощения водяного пара в видимой области от 19480 до 20500 cm^{-1} методом светодиодной спектроскопии были получены наборы спектроскопических параметров: центров и интенсивностей для 427 линий. С помощью этих экспериментальных данных были определены уровни энергии 21 колебательного состояния. Измеренные в работе центры линий хорошо согласуются с высокоточными расчетными данными [8]. Интенсивности спектральных линий водяного пара согласуются в пределах ошибки измерений с данными предыдущих измерений [7], а также с результатами вычислений [17].

Используемая в работе методика, с применением светодиодов в качестве источника излучения, позволила зарегистрировать спектральные линии в исследуемом диапазоне с высокой чувствительностью при малой длине оптического пути. Полученные значения центров и интенсивностей линий, а также их квантовая идентификация занесены в информационную систему W@DIS [12] и могут быть использованы для уточнения имеющихся данных по поглощению водяного пара в видимом диапазоне от 19480 до 20500 cm^{-1} .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 18-48-700003, 16-43-700492, 17-52-16022 НЦНИЛ_а).

Авторы выражают благодарность О.В. Науменко за полезное обсуждение результатов работы и предоставление данных IUPAC.

1. Tinetti G., Tennyson J., Caitlin A., Griffith C. Water in exoplanets // *Philos. Trans. R. Soc. A*. 2012. V. 370. P. 2749–2764.
2. Быков А.Д., Синуца Л.Н., Стариков В.И. Экспериментальные и теоретические методы в спектроскопии водяного пара. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. РАН, 1999. 376 с.
3. Mecke R. Das rotationsschwingungsspektrum des wasserdampfes. I // *Z. Phys.* 1933. V. 81, N 5–6. P. 313–331.
4. Antipov A.B., Bykov A.D., Kapitanov V.A., Lopasov V.P., Makushkin Yu.S., Tolmachev V.I., Ulenikov O.N., Zuev V.E. Water-vapor absorption spectrum in the 0.59- μm region // *J. Mol. Spectrosc.* 1981. V. 89, N 2. P. 449–459.
5. Camy-Peyret C., Flaud J.-M., Mandin J.-Y., Chevillard J.P., Brault J., Ramsay D.A., Vervloet M., Chauville J. The high-resolution spectrum of water vapor between 16500 and 25250 cm^{-1} // *J. Mol. Spectrosc.* 1985. V. 113, N 1. P. 208–228.
6. Carleer M., Jenouvrier A., Vandaele A.-C., Bernath P.F., Merienne M.F., Colin R., Zobov N.F., Polyansky O.L., Tennyson J., Savin V.A. The near infrared, visible, and near ultraviolet overtone spectrum of water // *J. Chem. Phys.* 1999. V. 111. P. 2444–2450.
7. Tolchenov R.N., Naumenko O., Zobov N.F., Shirin S.V., Polyansky O.L., Tennyson J., Carleer M., Coheur P.-F., Fally S., Jenouvrier A., Vandaele A.C. Water vapour line assignments in the 9250–26000 cm^{-1} frequency range // *J. Mol. Spectrosc.* 2005. V. 233, N 1. P. 68–76.
8. Tennyson J., Bernath P., Brown L., Campargue A., Csaszar A., Daumont L., Gamache R., Hodges J., Naumenko O., Polyansky O., Rothman L., Vandaele A., Zobov N., Derzia A., Fabri C., Fazliev A., Furtenbacher T., Gordon I., Lod L., Mizus I. IUPAC critical evaluation of the rotational-vibrational spectra of water vapor, Part III: Energy levels and transition wavenumbers for H_2^{16}O // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013. V. 117. P. 29–58.
9. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen L.H., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Muller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I., Wagner G. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013. V. 130. P. 4–50.
10. Jacquinet-Husson N., Crepeau L., Armante R., Boutamine C., Chedin A., Scott N.A., Crevoisier C., Crevoisier C., Capelle V., Boone C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Campargue A., Benner D.C., Benilan Y., Bezard B., Boudon V., Brown L.R., Coudert L.H., Coustenis A., Dana V., Devi V.M., Fally S., Fayt A., Flaud J.-M., Goldman A., Herman M., Harris G.J., Jacquemart D., Jolly A., Kleiner I., Kleinbohl A., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N., Lacome N., Lyulin O.M., Mandin J.-Y., Maki A., Mikhailenko S., Miller C.E., Mishina T., Moazzen-Ahmadi N., Muller H.S.P., Nikitin A., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Petkie D.T., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Remedios J., Rotger M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J., Xu L.-H. The 2009 edition of the GEISA spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2011. V. 112, N 15. P. 2395–2445.
11. URL: <http://spectra.iao.ru> (дата обращения: 14.05.2017).
12. URL: <http://wadis.saga.iao.ru> (дата обращения: 14.05.2017).
13. Serdyukov V.I., Sinitza L.N., Vasilchenko S.S. Highly sensitive Fourier transform spectroscopy with LED sources // *J. Mol. Spectrosc.* 2013. V. 290. P. 13–17.
14. Сердюков В.И. Новые возможности высокочувствительной регистрации спектров поглощения молекул в видимой области спектра // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 9. С. 817–821.
15. Васильченко С.С., Сердюков В.И. Спектр излучения неона как репер частотной шкалы для спектрофотометров // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 9. С. 822–825; Vasil'chenko S.S., Serdyukov V.I. Emission spectrum of neon as a frequency reference for spectrophotometers // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 2. P. 154–158.
16. Kruglova T.V., Shcherbakov A.P. Automated line search in molecular spectra based on nonparametric statistical methods: Regularization in estimating parameters of spectral lines // *Opt. Spectrosc.* 2011. V. 111. P. 353–356.
17. Barber R.J., Tennyson J., Harris G.J., Tolchenov R.N. A high-accuracy computed water line list // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2006. V. 368. P. 1087–1094.

18. Bykov A.D., Naumenko O.V., Pshenichnikov A.M., Sinita L.N., Shcherbakov A.P. An expert system for iden-

tification of lines in vibrational-rotational spectra // Opt. Spectrosc. 2003. V. 94. P. 528–537.

L.N. Sinita, V.I. Serdyukov, E.R. Polovtseva, A.D. Bykov, A.P. Shcherbakov. **Study of the water vapor absorption spectrum in the visible region from 19480 to 20500 cm^{-1} .**

The vibrational-rotational absorption spectrum of water vapor was recorded and analyzed in the visible region from 19480 to 20500 cm^{-1} . The measurements were carried out at the IFS-125M Fourier spectrometer with a resolution of 0.05 cm^{-1} at a pressure of 26.3 mbar, a temperature of (24 ± 1) °C at an optical path 24 m long. We used a multipass White cell with a base length of 60 cm. The light-emitting diode was used as the radiation source. The signal-to-noise ratio was about 20000. As a result of the spectrum analysis, a list of more than 420 lines has been formed, which includes line centers and intensity and quantum vibrational-rotational identification. More than 220 vibrational-rotational energy levels of 21 upper vibrational states have been determined.