

Программно-управляемый лазерный оптико-акустический спектрометр высокого разрешения. Методики и программы измерений и обработки слабых спектров поглощения атмосферных газов

В.А. Капитанов, К.Ю. Осипов*

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

Поступила в редакцию 16.07.2018 г.

Представлены результаты разработки программно-управляемого оптико-акустического спектрометра на основе диодного лазера ТЕС-520 (мощность излучения 30 мВт, область перестройки 6060–6600 см⁻¹, спектральная ширина линии излучения ~5Е-5 см⁻¹, область управляемой перестройки 0 ÷ 2,5 см⁻¹), измерителя длины волны лазера WS-UIR (погрешность измерения $\Delta\lambda/\lambda \sim 1\text{E-}8$) и оптико-акустического детектора кольцевого типа с пороговой чувствительностью ~3Е-10 Вт · см⁻¹ · Гц^{-1/2}. Предложены методики и программы измерений и обработки слабых спектров поглощения, представлены результаты исследований спектров Н₂О.

Ключевые слова: спектр поглощения, диодный лазер, оптико-акустический детектор, зеркальный модулятор; absorption spectrum, diode laser, photoacoustic detector, mirror modulator.

Введение

Метод лазерной оптико-акустической (ОА) спектроскопии широко применяется вот уже в течение почти 50 лет [1] для исследования спектров поглощения различных сред в широком диапазоне давлений и температур при использовании излучения различного спектрального состава от ультрафиолетового до радиоволнового [2–11]. Он относится к группе методов, основанных на схеме прямого детектирования, в которых детектором поглощенной мощности является сам образец. От других известных методов линейной абсорбционной спектроскопии его отличают следующие характерные особенности:

1. Регистрация ОА-сигнала на нулевом фоне; при отсутствии поглощения в образце ОА-сигнал равен нулю (однако следует иметь в виду наличие фонового сигнала, связанного с поглощением излучения окнами и стенками кюветы с исследуемым образцом).

2. Отношение сигнал-шум растет пропорционально мощности источника излучения.

3. ОА-сигнал пропорционален спектральному коэффициенту поглощения, что существенно упрощает обработку экспериментальных данных.

4. Поскольку измеряемая величина — интенсивный параметр исследуемого образца, т.е. не зависит от его размеров, измерения проводятся при малых размерах ОА-детектора.

С появлением новых мощных перестраиваемых диодных лазеров, новых конструкций ОА-ячеек, измерителей длины волны лазеров, автоматизации измерений и обработки результатов возможности лазерных ОА-спектрометров в получении высокоточных достоверных данных о спектрах поглощения атмосферных газов значительно возросли. Для регистрации слабых резонансных спектров поглощения, особенно континуального, и исследований формы контуров спектральных линий величина минимально обнаружимых лазерным ОА-спектрометром коэффициентов поглощения должна составлять порядка 10⁻⁹...10⁻¹⁰ см⁻¹, а погрешность измерений абсолютных значений длины волны не должна превышать (1–2)Е-4 см⁻¹.

Пороговая чувствительность по коэффициенту поглощения $\left(k_{\text{vmin}} = \frac{\sqrt{U_{\text{noise}}^2}}{R[W_0/2]} \right)$ уменьшается как с уве-

личением попадающей в ячейку интенсивности модулированного излучения лазера W_0 , чувствительности ОА-детектора R , так и с уменьшением уровня шумов $\sqrt{U_{\text{noise}}^2}$, включающих шумы микрофона и регистрирующей системы, а также внешний акустический шум.

Целью настоящего исследования является разработка высокоточного, высокочувствительного ОА-спектрометра и получение с его помощью достоверных данных о селективном и континуальном поглощении атмосферных газов, определение параметров моделей, описывающих спектр. Максимальное внимание при конструировании уделено оптимизации

* Венедикт Андреевич Капитанов (venedikt@iao.ru);
Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru).

параметров, определяющих пороговую чувствительность спектрометра и погрешностей измерений абсолютного значения длины волны перестраиваемого диодного лазера, а также разработке методик и программ регистрации и обработки данных измерений.

Программно-управляемый спектрометр на базе диодного лазера и оптико-акустического детектора

Блок-схема оптико-акустического спектрометра на базе диодного лазера (ДЛОАС) представлена на рис. 1.

Диодный лазер TEC-520-1590-030 с внешним резонатором и контроллером тока и температуры Pilot PZ 0500 (1) генерирует непрерывное излучение в спектральном диапазоне $6060 \div 6600 \text{ см}^{-1}$ с шириной линии в режиме программно-управляемой перестройки длины волны порядка 1 МГц ($\sim 3,3\text{E-}6 \text{ см}^{-1}$). Выходная мощность лазера зависит от длины волны излучения и составляет от $0,014 \text{ Вт}$ на краях до $0,030 \text{ Вт}$ в центре спектрального диапазона и контролируется фотодиодом (7). Настройка частоты излучения лазера на выбранную длину волны в диапазоне работы производится поворотом дифракционной решетки, осуществляемым вручную. Поворот дифракционной решетки посредством пьезокерамического элемента (ПКЭ) позволяет реализовать одночастотное (без скачков мод) программно-управляемое сканирование частоты излучения в диапазоне $5\text{E-}(5 \div 2,8) \text{ см}^{-1}$. Форма напряжения на ПКЭ зада-

ется программой управления и сбора данных и генерируется 16-битным цифроаналоговым преобразователем и пьезоусилителем MLD-1000 (2) в диапазоне $0,015 \div 100 \text{ В}$.

Значение длины волны непрерывного или импульсного излучения диодного лазера контролируется измерителем длины волны WS-UIR (6) с частотой до 120 Гц и относительной погрешностью $\Delta\lambda/\lambda = 1\text{E-}8$. Калибровка длины волны производится с использованием стабилизированного по частоте He-Ne-лазера SIOS SL 03 с периодичностью до 24 ч . Абсолютная стабильность длины волны излучения He-Ne-лазера $\lambda = 632,99102\text{E-}9 \text{ м}$ составляет $\pm 2,5 \text{ МГц}$ ($\pm 8,3\text{E-}5 \text{ см}^{-1}$) за 24 ч [18]. Для определения погрешности измерений абсолютного значения частоты излучения WS-UIR длина волны He-Ne-лазера измерялась в течение 24 ч с частотой 5 Гц с использованием специально написанной программы в среде LabVIEW и составила $\pm 5\text{E-}5 \text{ см}^{-1}$.

Для выбора параметров напряжения на ПКЭ и алгоритма измерений длины волны при регистрации спектров была проведена серия контрольных измерений частоты излучения диодного лазера при изменении напряжения. При пилообразной (плавный рост и резкий спад) форме напряжения на выходе пьезоусилителя MLD-1000 наблюдались увеличивающееся с ростом напряжения запаздывание изменения длины волны и сбой генерации при резком спаде. Для предотвращения поломки лазера и возможности двукратного измерения спектра (увеличение отношения сигнал-шум в $1,4$ раза) была выбрана треугольная форма напряжения (рис. 2).

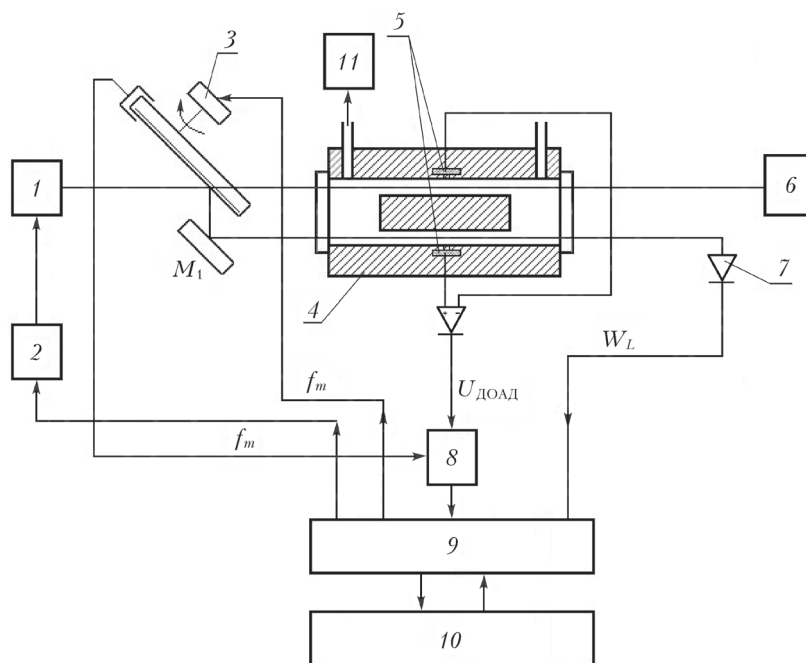


Рис. 1. Блок-схема ДЛОАС: 1 – диодный лазер TEC-520-1590-030 с контроллером тока и температуры Pilot PZ 0500 [12]; 2 – пьезоусилитель перестройки длины волны излучения MLD-1000 [13]; 3 – зеркальный модулятор [14]; 4 – дифференциальный ОА-детектор; 5 – микрофоны; 6 – измеритель длины волны излучения WS-UIR [15]; 7 – фотодиод; 8 – синхронный детектор Scitec 420 [16]; 9 – плата NI-DAG [17]; 10 – персональный компьютер; 11 – вакуумный пост; f_m – частота модуляций; $U_{\text{ДОАД}}$ – напряжение; W_L – мощность; M_1 – зеркало

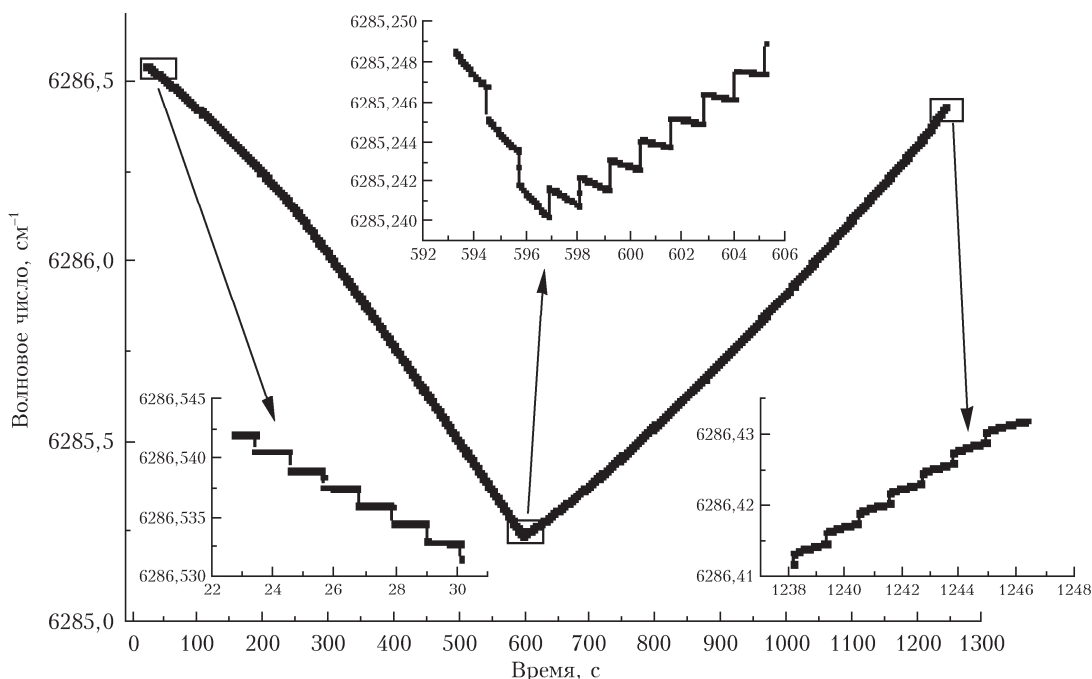


Рис. 2. Зависимость длины волны диодного лазера от напряжения на ПКЭ

При плавном уменьшении напряжения наблюдается эффект памяти. И при любой форме напряжения на выходе пьезоусилителя MLD-1000 дискретизация шкалы длин волн не эквидистантна.

Конструкция, принцип работы, модель, расчет технических характеристик дифференциального оптико-акустического детектора (ДОАД) и его применение в разработке новых приборов достаточно подробно описаны в работах [19–22]. Отметим две важные особенности конструкции ДОАД:

- 1) значительное, на порядок, уменьшение влияния внешнего акустического шума за счет использования двух микрофонов и дифференциальной схемы регистрации сигнала;
- 2) возможность использования зеркального модулятора интенсивности [19], что обеспечивает дву-

кратное повышение мощности лазерного излучения, поступающей в поглощающую среду, и, как следствие, увеличение отношения сигнал-шум.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ДОАД имеет резонансный вид с добротностью резонанса порядка 5–50 (в зависимости от давления газа); стабильность частоты модуляции и точность изготовления диска прерывателя оказывают существенное влияние на отношение сигнал-шум. В спектрометре используется специально разработанный высокостабильный зеркальный модулятор [14], что позволяет уменьшить шум, обусловленный резонансным видом АЧХ ДОАД. На рис. 3 приведен пример регистрации спектров поглощения метана при давлении 3000 Па, зарегистрированных с модулятором Scitec и зеркальным модулятором, отношение сигнал-шум возросло в 2 раза.

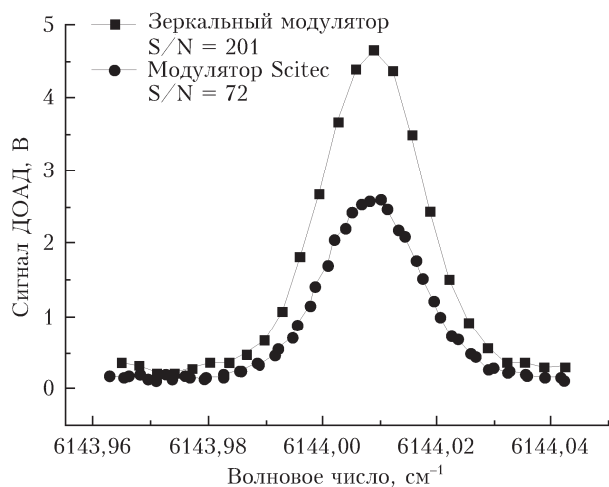


Рис. 3. Спектр поглощения метана при давлении 3000 Па, зарегистрированный с модулятором Scitec и зеркальным модулятором

Методика измерений спектра поглощения и программно-управляемая регистрация слабых спектров поглощения

Регистрация сигнала ДОАД осуществляется методом синхронного детектирования с амплитудной или частотной модуляцией с использованием синхронного детектора Scitec 420.

Для записи спектров поглощения с использованием перестраиваемых по частоте лазеров, как правило, используют две методики измерений, определяемых режимами сканирования длины волны лазера, — плавную или ступенчатую. Для высокоточных измерений контура линий с плавно перестраиваемыми лазерами максимальная скорость сканирования

$d\lambda/dt$ задается полушириной измеряемой спектральной линии γ и временем накопления сигнала (постоянная детектирования τ) и не должна превышать $d\lambda/dt < \gamma/\tau$. Сигнал ДООД при этом регистрируется аналоговыми преобразователями.

При ступенчатом сканировании длина волны изменяется с периодом $\Delta\lambda$ и после временной задержки $\Delta t = 2\pi\tau$ регистрируется сигнал, пропорциональный сечению поглощения. Эта методика имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывным сканированием: удобнее реализуется в цифровом виде, дискретные сигналы в меньшей степени подвержены искажениям в процессе передачи и хранения, они легко преобразуются в двоичный цифровой код и обрабатываются с помощью цифровых вычислительных устройств. В программно-управляемом спектрометре реализована методика ступенчатого сканирования.

Методика измерений спектров поглощения предусматривает:

1) приготовление исследуемой смеси газов в вакуумном посту (11) и напуск смеси в ДООД. Измерение давления вакуумметром PFEIFFER CMR-361 [23];

2) настройку вручную длины волны диодного лазера в конец исследуемого спектрального диапазона;

3) выбор диапазона сканирования и периода дискретизации длины волны в зависимости от полуширины исследуемых спектральных линий и задание соответствующих значений диапазона U_{\max} и периода квантования напряжения ΔU на ПКЭ;

4) задание постоянной детектирования τ синхронного детектора и временной задержки (период квантования $\Delta t = 2\pi\tau$);

5) в зависимости от давления смеси установку и контроль частоты модуляции, равной резонансной частоте ДООД;

6) настройку фазы опорного сигнала синхронного детектора;

7) треугольную форму изменения напряжения на ПКЭ ($0 \rightarrow U_{\max} \rightarrow 0$, период ΔU) в зависимости от времени с шагом Δt ;

8) одновременную регистрацию длины волны излучения лазера и напряжения на выходе синхронного детектора с периодом Δt ;

9) регистрацию частоты модуляции и сигнала, пропорционального мощности излучения лазера;

10) формирование файлов зависимостей: напряжения на выходе синхронного детектора от длины волны; длины волны и частоты модуляции от времени, и визуализацию соответствующих графиков.

Для реализации методики в среде графического программирования LabVIEW была разработана и отлажена программа управления сканированием длины волны излучения диодного лазера и стабилизации частоты модуляции, а также синхронной регистрации абсолютного значения частоты излучения и сигнала ДООД. На рис. 4 представлена рабочая панель программы управления параметрами спектрометра и сбора данных.

Методики и программы обработки первичных данных спектрометра

Первичные данные спектрометра представляют собой двукратную запись спектра выходного сигнала синхронного детектора с возможностью усреднения сигналов и увеличения отношения сигнал-шум в 1,4 раза. Необходимо отметить, что регистрация спектров при прямом и обратном сканировании позволяет дополнительно проконтролировать корректность выбора ΔU и Δt . При неправильном задании

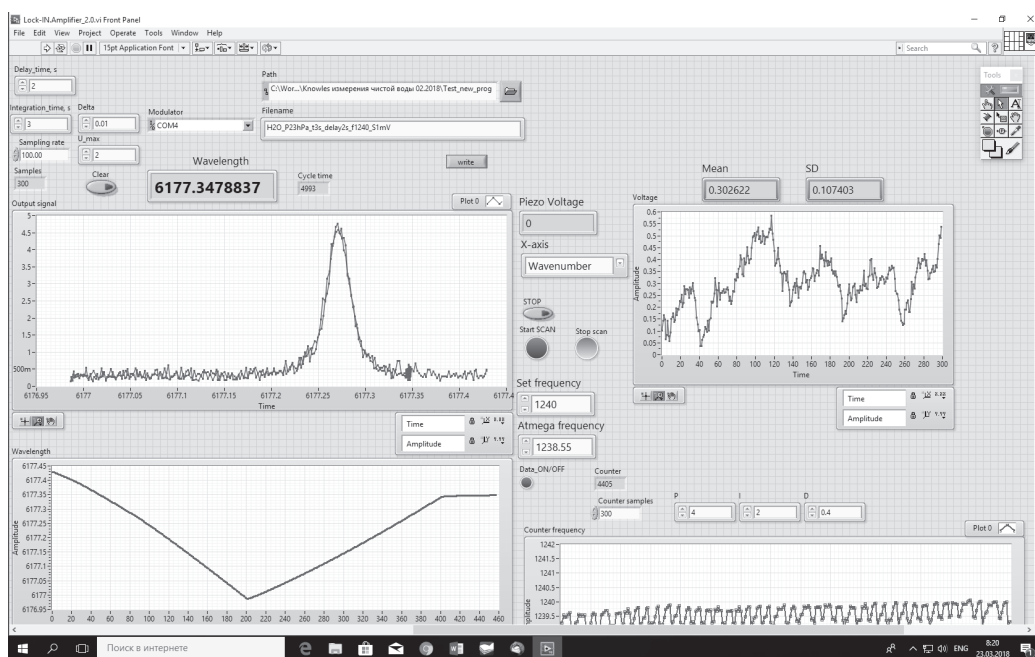


Рис. 4. Программа управления параметрами спектрометра и сбора данных

этих параметров на графике наблюдается сдвиг спектральных линий. В связи с особенностями перестройки длины волны лазера, которые обсуждались выше (см. рис. 2), спектры при прямом и обратном сканировании отличаются значительной неравномерностью дискретизации шкалы длин волн. Для создания условий усреднения спектров в среде программирования LabVIEW была разработана программа, обеспечивающая совпадения значений длины волны в каждой точке обоих спектров с программно-задаваемым периодом дискретизации. Также необходимо отметить, что в связи с изменением длины волны за время Δt невозможно определить ее среднее значение. Это приводит к увеличению погрешности регистрации абсолютного значения длины волны с $\pm 5E-5$ до $\pm 2E-4$ см⁻¹.

Для преобразования спектра сигнала, зарегистрированного в единицах напряжения (В), в единицы сечения поглощения (см²/мол.) необходимо провести процедуру калибровки и определить передаточный коэффициент преобразования. Методики калибровки и расчета коэффициента преобразования приведены в [11], спектр поглощения σ_v можно вычислить по соотношению

$$\sigma_v [\text{см}^2/\text{мол.}] = U_{\text{ДОАД}} \frac{S [\text{см}/\text{мол.}]}{S [\text{В}/\text{см}]}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ДОАД}}$ – сигнал на выходе синхронного детектора, В; S [см/мол.] – интенсивность спектральной линии, приведенная в базе данных HITRAN2016 [24]; S [В/см] – интенсивность линии, зарегистрированной спектрометром.

Интенсивность наиболее сильной линии S [В/см], зарегистрированной спектрометром, определяется в результате подгонки современной моделью контура НТР [25]. Подгонка производится разработанной

в среде LabVIEW программой обработки высокоточных спектров поглощения молекул атмосферных газов (рис. 5). По соотношению (1) вычисляется спектр сечения поглощения, и дополнительной подгонкой определяются спектроскопические параметры линий поглощения (положения центров, интенсивностей, параметров ударного уширения и сужения и др.) и соответствующие среднеквадратичные погрешности измерений спектроскопических параметров.

Спектр водяного пара в диапазоне 6175–6178 см⁻¹

На разработанном спектрометре проведены регистрация и обработка спектра поглощения водяного пара при различном давлении. В качестве примера на рис. 5 представлена панель программы обработки высокоточных спектров с подгонкой спектра поглощения водяного пара при давлении 2400 Па и температуре 297 К.

В табл. 1 приведены положения центров и интенсивностей зарегистрированных линий в диапазоне 6175,4÷6178 см⁻¹ при давлении 2,4 кПа. Также определена пороговая чувствительность спектрометра по коэффициенту поглощения. Среднеквадратичное отклонение разности между экспериментальным и модельным спектром составило $(1 \div 3)E-8$ см⁻¹ в зависимости от давления водяного пара.

Из зависимостей спектроскопических параметров от давления слабой линии поглощения с центром $\nu_0 = 6177,27206$ см⁻¹ (полоса $4\nu_2$, 110–101) определены положение центра линии при нулевом давлении и коэффициенты: ударного уширения Γ_0 (рис. 6, а), зависящий от скорости сужения Γ_2 (рис. 6, б), и сдвига центра линии Δ_0 (рис. 6, в).

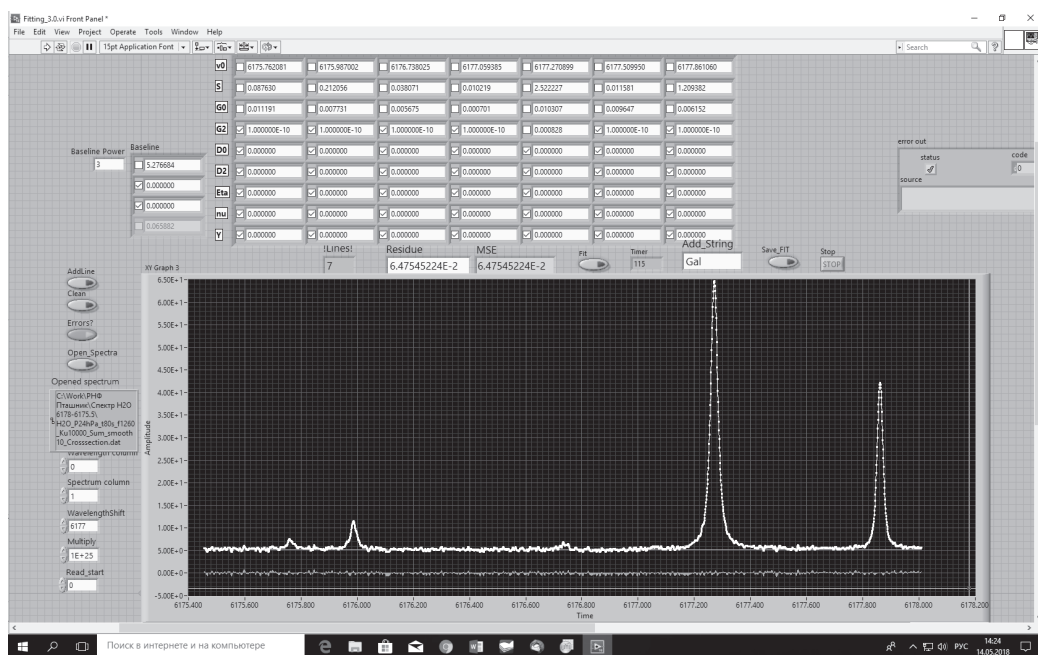


Рис. 5. Панель программы обработки спектров поглощения

Таблица 1

Сравнение измеренных интенсивностей и положений центров линий поглощения с данными HITRAN2016

HITRAN2016		Наши данные	
ν_0 , см^{-1}	S , $\text{см}^2/\text{мол.}$	ν_0 , см^{-1}	S , $\text{см}^2/\text{мол.}$
6175,761500	4,870E-27	6175,7621(6)	9,4(4)E-27
6175,988200	1,538E-26	6175,9870(2)	2,28(3)E-26
6176,726700	6,598E-28	—	—
6176,743600	1,980E-27	6176,7380(8)	4,1(3)E-27
6177,062100	1,825E-27	6177,059(2)	1,1(3)E-27
6177,272060	2,706E-25	6177,27209(2)*	2,711(4)E-25
6177,471200	1,272E-27	6177,469(2)	1,5(3)E-27
6177,860700**	7,743E-26	6177,8610(2)**	1,300(3)E-25
6177,866499**	2,582E-26		

Примечание. * Для этой линии определены коэффициент сдвига и абсолютное значение положения центра линии поглощения при нулевом давлении; ** при приведенных в базе HITRAN параметрах в экспериментальном спектре должны наблюдаться значительная асимметрия и большая ширина контура линии, но этого не наблюдается.

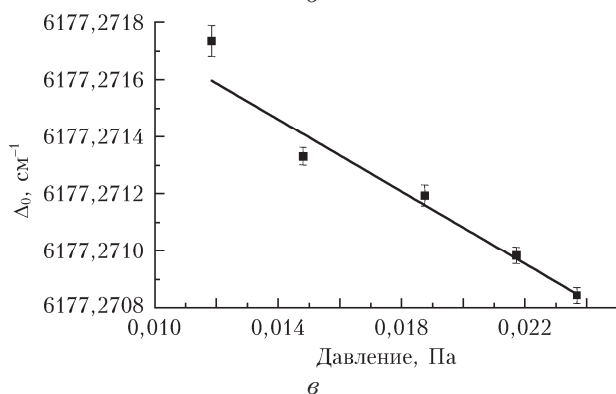
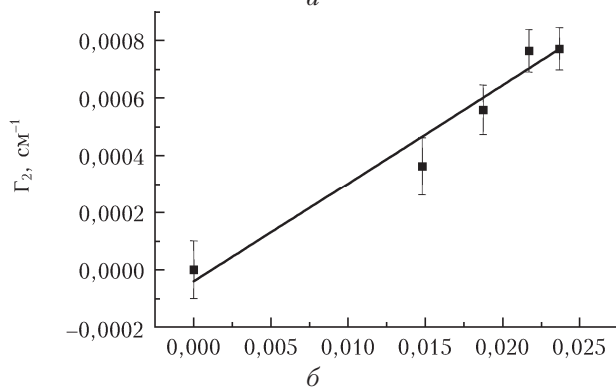
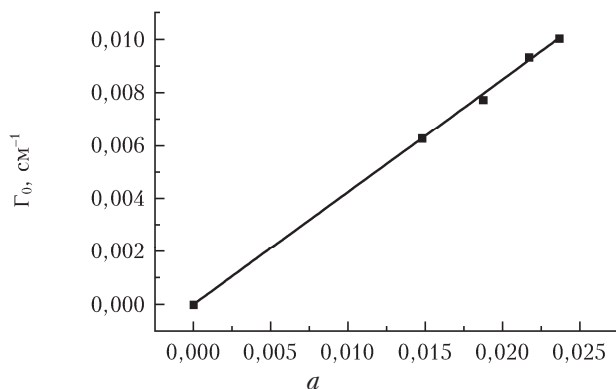


Рис. 6. Зависимость спектроскопических параметров Γ_0 (а), Γ_2 (б) и Δ_0 (в) от давления водяного пара

Значения коэффициентов ударного уширения Γ_0 и сдвига центра Δ_0 , а также коэффициента, учитывающего зависимость полуширины контура Фойгта от квадрата скорости поглощающей молекулы Γ_2 (ударное сужение), приведены в табл. 2. Коэффициенты Δ_0 и Γ_2 определены впервые.

Таблица 2

Спектроскопические параметры линии поглощения

Источник	ν_0 , см^{-1}	Γ_0 , $\text{см}^2/\text{атм}$	Δ_0 , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$	Γ_2 , $\text{см}^{-1}/\text{атм}$
HITRAN2016	6177,272060	0,4510	—	—
Наши данные	6177,2723(2)	0,425(6)	-0,063(8)	0,034(4)

Заклучение

Создан программно-управляемый оптико-акустический спектрометр на основе диодного лазера ТЕС-520 (мощность излучения 30 мВт, область перестройки 6060–6600 см^{-1} , спектральная ширина линии излучения $\sim 5\text{E}-5$ см^{-1} , область управляемой перестройки 0 ÷ 2,5 см^{-1}), измерителя длины волны лазера WS-UIR (погрешность измерения $\Delta\lambda/\lambda \sim 1\text{E}-8$) и оптико-акустического детектора кольцевого типа с пороговой чувствительностью $\sim 3\text{E}-10$ Вт · см^{-1} · Гц $^{-1/2}$. Ниже приведены технические характеристики спектрометра.

Спектральный диапазон 6060–6600 см^{-1}
 Спектральное разрешение $\sim 3,3\text{E}-6$ $\text{см}^{-1}/24$ ч
 Диапазон плавной перестройки (2,8–3) $\text{см}^{-1}/100$ В
 Погрешность измерения абсолютного значения длины волны 2E-4 $\text{см}^{-1}/24$ ч
 Пороговая чувствительность по коэффициенту поглощения (1 ÷ 3) E-8 см^{-1}
 Диапазон давлений 0–100 кПа
 Погрешность измерения давления 0,1 кПа

Предложены методики и реализованы программы измерений и обработки слабых спектров поглощения, представлены результаты исследований спектров H_2O . Впервые определены спектроскопические параметры слабой линии поглощения с центром $\nu_0 = 6177,27206$ см^{-1} (полоса $4\nu_2$, 110–101): поло-

жение центра линии при нулевом давлении, а также коэффициенты ударного уширения Γ_0 , зависящий от скорости сужения Γ_2 , и сдвига центра линии Δ_0 . Показано существенное различие со значениями параметров, приведенными в базе спектральных данных HITRAN2016.

Авторы выражают благодарность Ю.Н. Пономареву и И.В. Пташнику за помощь в приобретении оборудования и постоянную поддержку в проведении исследований, А.Е. Протасевичу за помощь в программировании модели контура линии, А.Н. Куряку за помощь в проектировании и изготовлении ДООД.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-17-10096 (приобретение диодного лазера, пьезоусилителя, вакуумного датчика, поддержка проведения экспериментов) и Программы П.10.3, Проект П.10.3.6 (приобретение измерителя длин волн, изготовление усилителей и источников питания, поддержка проведения экспериментов).

1. *Kerr E.L., Atwood J.G.* The laser illuminated spectrophone: A method for measurement of weak absorptivity in gases at laser wavelengths // *Appl. Opt.* 1968. V. 7, N 5. P. 915–921.
2. *Антипов А.Б., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А.* Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии молекулярных газов. Новосибирск: Наука, 1984. 128 с.
3. *Жаров В.П., Летохов В.С.* Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
4. *Tam A.C.* Photo Acoustic: Spectroscopy and other application // *Ultrasensitive Laser Spectroscopy* / D.S. Klinger (ed.). New York: Academic Press, 1983. P. 1–108.
5. *West G.A., Barret J.J., Siebert D.R., Reddy K.V.* Photoacoustic spectroscopy // *Rev. Sci. Instrum.* 1983. V. 54. P. 797.
6. *Dewey C.F.* Opto-acoustic spectroscopy // *Opt. Eng.* 1974. V. 13, N 6. P. 483–488.
7. *Rosengren L.G.* Optimal optoacoustic detector design // *Appl. Opt.* 1975. V. 14, N 8. P. 1960–1976.
8. *Sigrist M.W.* Laser generation of acoustic waves in liquids and gases // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 60, N 7. P. R83–R121.
9. *Meyer P.L., Sigrist M.W.* Atmospheric pollution monitoring using CO₂ laser photoacoustic spectroscopy and other techniques // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61, N 7. P. 1779–1807.
10. *Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N.* High resolution ethylene absorption spectrum between 6035 and 6210 cm⁻¹ // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 90, N 2. P. 235–241.
11. *Kapitanov V.A., Osipov K.Yu., Protasevich A.E., Ponomarev Yu.N.* Collisional parameters of N₂ broadened methane lines in the R9 multiplet of the 2v₃ band. Multispectrum fittings of the overlapping spectral lines // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113, N 16. P. 1985–1992.
12. URL: https://www.sacher-laser.com/home/scientific-lasers/tunable_lasers/littman/tec_500_tec_520_littman_metcalf_laser_system_lion.html (last access: 15.06.2018).
13. URL: https://www.sacher-laser.com/home/electronic-systems/pilot/pc/pilot_pc_500ma3000ma.html (last access: 15.06.2018).
14. *Осипов К.Ю., Капитанов В.А.* Прецизионный зеркальный оптический диск для модулятора // *НОУ-ХАУ.* 02-2014 от 14.11.2014 ИОА СО РАН, г. Томск, пл. Академика Зюева, 1. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
15. URL: https://www.toptica.com/fileadmin/Editors_English/03_products/09_wavemeters_photonicals/04_wavelength_meter/HighFinesse_Wavemeter_web.pdf (last access: 10.06.2018).
16. URL: http://www.scitec.uk.com/lockin_amplifier/420 (last access: 12.04.2018).
17. URL: <http://www.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/global/lang/ru/pg/1/q/ni%20pci%206251/> (last access: 12.04.2018).
18. URL: https://sios-de.com/wp-content/uploads/2016/02/SL-03_e_2014.pdf (last access: 12.04.2018).
19. *Zeninary V., Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Courtois D.* Design and characteristics of a differential Helmholtz resonant photoacoustic cell for infrared gas detection // *Infrared Phys. Technol.* 1999. V. 40. P. 1–23.
20. *Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Song K., Cha H.-K., Lee J.* Resonance photoacoustic spectroscopy and gas analysis of gaseous flow at reduced pressure // *Appl. Phys. B.* 2001. V. 73. P. 745–750.
21. *Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Tyryshkin I.S., Roslov A.P.* Two-channel opto-acoustic diode laser spectrometer and fine structure of methane absorption spectra in 6070–6180 cm⁻¹ region // *Spectrochim. Acta A.* 2007. V. 66. P. 811–818.
22. *Шерстов И.В., Капитанов В.А., Азеев Б.Г., Караныхов А.И., Пономарев Ю.Н.* Лазерный оптико-акустический течениякатель // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 2–3. С. 119–123.
23. URL: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PTR24601.en.pdf> (last access: 10.04.2018).
24. URL: <http://spectra.iao.ru/> (last access: 15.06.2018).
25. *Tennyson J. Bernath P.F., Campargue A., Csaszar A.G., Daumont L., Gamache R.R., Hodges J.T., Lisak D., Naumenko O.V., Rothman L.S., Tran H., Zobov N.F., Buldyreva J., Boone C.D., de Vizia M.D., Gianfrani L., Hartmann J.M., McPheat R., Weidmann D., Murray J., Ngo N.H., Polyansky O.L.* Recommended isolated-line profile for representing high-resolution spectroscopic transitions, 2014, IUPAC Technical Report.

V.A. Kapitanov, K.Y. Osipov. Software-controlled high resolution laser photoacoustic spectrometer. Methods and programs for measuring and processing weak absorption spectra of atmospheric gases.

A software-controlled photoacoustic spectrometer is developed on the basis of TEC-520 diode laser (output power 30 mW, coarse tuning range 6060–6600 cm⁻¹, line width ~5E-5 cm⁻¹, fine tuning range 0÷2.5 cm⁻¹), WS-UIR laser wavelength meter (relative error $\Delta\lambda/\lambda \sim 1E-8$), and resonance photoacoustic detector with threshold sensitivity ~3E-10 W · cm⁻¹ · Hz^{-1/2}. Procedures and computer programs for spectra measurements and processing are developed. The results of the water vapor spectra measurements are presented.