

Б.А. Тихомиров, А.Б. Тихомиров, К.М. Фирсов

Нерезонансное поглощение импульсного излучения лазера на рубине атмосферным воздухом и смесью H_2O с азотом

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.04.2001 г.

С использованием оптико-акустического спектрометра с пространственно-временным разрешением сигналов и пороговой чувствительностью по коэффициенту молекулярного поглощения $k_\lambda^{\min} \leq 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ впервые измерены коэффициенты слабого нерезонансного поглощения импульсного излучения лазера на рубине с длиной волны $\lambda = 694,300 \text{ нм}$ бинарными смесями водяного пара с азотом и атмосферным воздухом. Полученные результаты подтверждают правомочность сделанного ранее другими авторами заключения о наличии в атмосферном воздухе субстанции, являющейся источником избыточного поглощения коротковолнового излучения в атмосфере, отличного от молекулярного поглощения.

Введение

В статье Ю.А. Пхалагова с соавт. [1] обсуждаются возможные физические эффекты, определяющие природу избыточного поглощения коротковолнового ($0,44 - 3,97 \text{ мкм}$) оптического излучения в облаках [2, 3] и на протяженных трассах в природных условиях [4–6]. Под избыточным поглощением в литературе понимается невязка между экспериментальными данными и данными модельных расчетов. Отмечается, что выявление природы наблюдаемого в экспериментах [2–6] избыточного («аномального») поглощения излучения очень важно для количественных оценок основных факторов, определяющих радиационный баланс Земли как при наличии облаков, так и в безоблачной атмосфере.

Среди различных причин существования избыточного поглощения коротковолнового оптического излучения в атмосфере называется континуальное поглощение излучения водяным паром [1]. Данные лабораторных экспериментов, когда информация о коэффициенте континуального поглощения можно было бы получить, исключая мешающие факторы (аэрозольное и рэлеевское рассеяние, аппаратные эффекты и т.д.), в литературе отсутствуют. В связи с этим постановка экспериментов, направленных на измерение коэффициента нерезонансного поглощения излучения в коротковолновой области спектра атмосферным воздухом и его основными газовыми составляющими в контролируемых лабораторных условиях, представляет большой интерес.

Целью настоящей работы является измерение коэффициента поглощения излучения моноимпульсного лазера на рубине с длиной волны $694,300 \text{ нм}$ смесями водяного пара с азотом и атмосферным воздухом в зависимости от концентрации водяного пара оптико-акустическим (ОА) методом лазерной спектроскопии,

сравнение полученных экспериментальных данных для каждой из смесей между собой и с результатами расчетов коэффициентов молекулярного поглощения.

Необходимо отметить, что данные экспериментальных исследований в открытой атмосфере [4–6] отличаются от результатов расчетов континуального поглощения излучения водяным паром [7, 8] на 1–2 порядка. В абсолютных единицах экспериментальные данные о коэффициентах поглощения коротковолнового излучения атмосферным воздухом превышают расчетные данные на величину $\Delta k_\lambda \sim 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ [1]. Следовательно, для измерений коэффициентов избыточного поглощения коротковолнового излучения атмосферным воздухом в лабораторных условиях требуются спектрометры с пороговой чувствительностью по коэффициенту поглощения $k_\lambda^{\min} \leq 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. Поэтому первоочередными задачами, решаемыми в настоящей статье, являлись доведение пороговой чувствительности ОА-спектрометра с лазером на рубине [9] до 10^{-8} см^{-1} и совершенствование методики измерений.

Техника и методика измерений

Схема *ОА-спектрометра* представлена на рис. 1. Спектрометр включает в себя перестраиваемый по частоте лазер на рубине, ОА-детектор с блоками усиления и регистрации формы ОА-сигнала, вакуумный пост для откачки ячейки ОА-детектора и напуска исследуемых газов, калориметр для измерения энергии лазерных импульсов, систему для измерения сдвига длины волны и спектра излучения лазерных импульсов.

Импульсный лазер на рубине с пассивной модуляцией добротности и изменяемой от импульса к импульсу длиной волны излучения включает в себя активный элемент длиной 180 мм и диаметром 8 мм , помещенный в двухламповый эллиптический осветитель

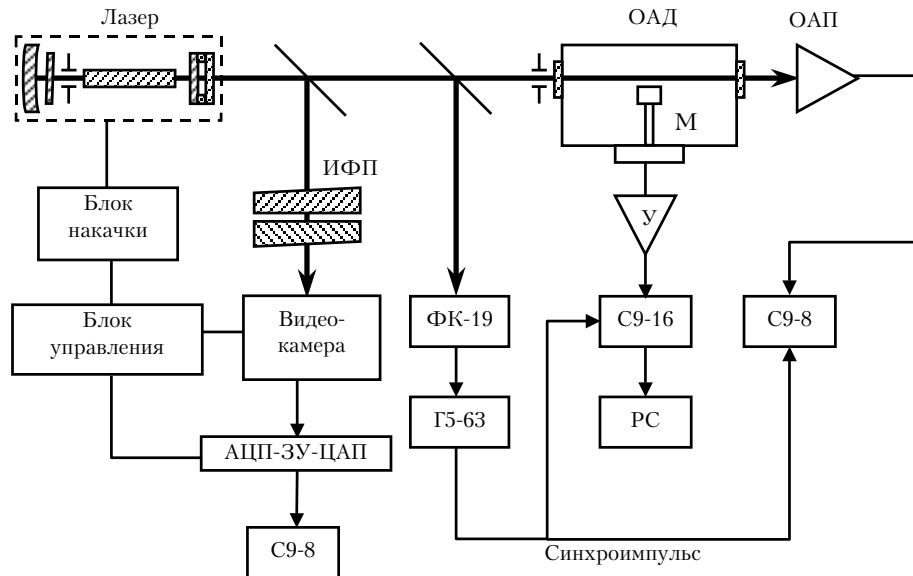


Рис. 1. Схема ОА-спектрометра с лазером на рубине

с водяным охлаждением. Длина активной области рубинового стержня с перпендикулярными к оси торцами равна 120 мм. Заднее сферическое зеркало резонатора лазера с коэффициентом отражения $\rho \approx 100\%$ имеет радиус кривизны $R = 100$ см. В качестве выходного зеркала лазера используется резонансный отражатель из двух плоскопараллельных пластинок, помещенный в радиатор с водяным подогревом. Оптическая длина резонатора составляет величину $L = 0,98 \cdot R = 98$ см, что согласно данным монографии [10] позволяет получить наиболее узкий спектр излучения лазера с пассивной модуляцией добротности плоскосферического резонатора.

Перестройка длины волны излучения λ от импульса к импульсу осуществлялась путем изменения температуры резонансного отражателя t_r (плавная перестройка) и температуры рубинового стержня (грубая перестройка). При фиксации температуры резонансного отражателя с точностью $\delta t_r = \pm 0,02$ К разброс сдвига длины волны от импульса к импульсу не превышает $\delta \lambda = \pm 10^{-3}$ нм. Управление температурой активного элемента и резонансного отражателя осуществляется с помощью двух термостатов У4.

Для модуляции добротности лазера и генерации гигантских импульсов длительностью $\tau_{\text{н}} \approx 50$ нс используется пассивный затвор на основе стекла КС-19, который устанавливается вплотную к заднему зеркалу лазера. Для частичной разгрузки и защиты затвора от разрушения мощным импульсом излучения между активным элементом и затвором устанавливается диафрагма с диаметром отверстия ~ 5 мм, а активный элемент разбюстируется таким образом, чтобы отраженное от торцов активного элемента сфокусированное излучение попадало на поглощающую поверхность диафрагмы.

В отличие от ОА-спектрометра [9] в данном эксперименте в составе спектрометра используется ОА-

детектор с пространственно-временным разрешением сигналов. Цилиндрическая поглощающая ячейка ОА-детектора имеет диаметр 20 см и длину 30 см. В центре ячейки находится полудюймовый конденсаторный микрофон. На торцах ячейки установлены прозрачные окна для ввода и вывода излучения. Расстояние от лазерного пучка до микрофона 1,5 – 2 см. Такая конструкция ячейки позволила полностью отделить во времени полезный ОА-сигнал, обусловленный поглощением излучения исследуемым газом, от паразитных фоновых сигналов. Первым импульсом давления, воздействующим на мембрану микрофона, является импульс, связанный с поглощением излучения в объеме газа рядом с микрофоном, и только значительно позже на мембрану воздействуют импульсы давления, обусловленные поглощением излучения окнами и стенками ячейки.

Сигнал ОА-детектора усиливается широкополосным усилителем с коэффициентом усиления $k_{\text{ус}} = 1000$ и поступает на вход цифрового осциллографа С9-16. Погрешность измерения амплитуды ОА-сигнала для центра линии поглощения H_2O 694,380 нм согласно паспортным данным осциллографа составляет величину около 1,5%. Синхронизация запуска развертки луча осциллографа с лазерным импульсом осуществляется с помощью фотоприемника ФК-19 и генератора импульсов Г5-63. Для документирования оцифрованных ОА-сигналов осциллограф через интерфейс связан с компьютером (РС).

Для удобства, увеличения скорости и улучшения точности измерения энергии лазерных импульсов на выходе ячейки ОА-детектора устанавливается ОА-приемник (ОАП) со временем быстрого действия около 1 с. Амплитуда сигнала ОАП, пропорциональная энергии лазерного импульса, измеряется с помощью цифрового осциллографа С9-8 с погрешностью 1,5%. Для определения энергии лазерных импульсов в абсолютных

единицах в начале каждой серии измерения коэффициентов поглощения ОАП заменялся на серийный калориметр ИКТ-1Н. Энергия импульса излучения составляла величину $E \approx (50 \pm 10)$ мДж.

Система измерения сдвига длины волны и спектра излучения лазерных импульсов включает в себя интерферометр Фабри–Перо, длиннофокусный объектив и автоматический считыватель интерферограмм на базе видеокамеры «Электроника Л-801». Скан интерферограммы по диаметру интерференционных колец воспроизводится на экране осциллографа С9-8, с помощью которого осуществляются измерения сдвига длины волны от импульса к импульсу и ширины спектра излучения лазерных импульсов. В эксперименте использовались интерферометры Фабри–Перо с базами 1 и 30 мм.

Спектр поглощения атмосферного воздуха при давлении $P_{\text{общ}} = 1005$ мбар, температуре $T = 298$ К и парциальном давлении водяного пара $P_{\text{H}_2\text{O}} = 18,2$ мбар, соответствующий области перестройки лазера на рубине и рассчитанный с использованием банка спектральных данных HITRAN-96 [11], представлен на рис. 2а.

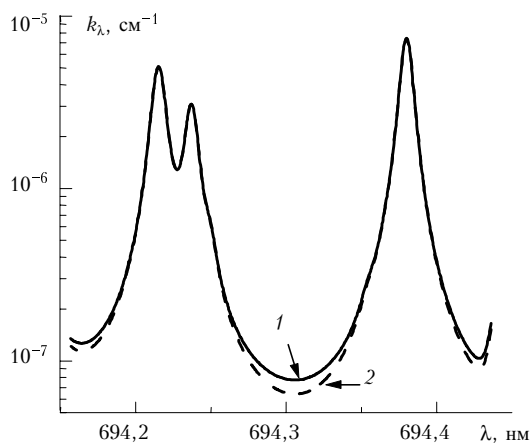


Рис. 2а. Спектр поглощения атмосферного воздуха в области генерации лазера на рубине

Спектр рассчитан по модели SKD0 [12] с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) континуального поглощения излучения водяным паром. В эту область попадают хорошо известные линии поглощения водяного пара колебательной полосы $\nu_1 + 3\nu_3$ с длинами волн для центров линий 694,215, 694,237 и 694,380 нм. Несмотря на то что данные линии поглощения H_2O экспериментально хорошо исследованы [13–16], измерения коэффициента поглощения в крыльях линий из-за недостаточной чувствительности спектрометров до сих пор не проводились. Из рис. 2а видно, что минимальное значение коэффициента поглощения воздуха в рассматриваемом участке спектра составляет величину $k_\lambda < 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ при достаточно большой влажности и даже для модели, учитывающей континуальное поглощение.

На рис. 2б представлен рассматриваемый участок спектра, полученный в настоящей работе с помощью ОА-спектрометра (см. рис. 1) при базе интерферометра Фабри–Перо $t = 1$ мм.

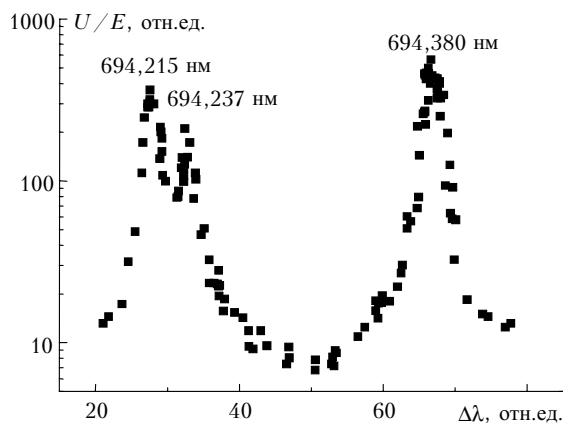


Рис. 2б. Зависимость сигнала ОА-спектрометра U/E от относительного сдвига длины волны лазера на рубине. Измерения выполнены при $T = 298$ К, $P_{\text{общ}} = 1005$ мбар и $P_{\text{H}_2\text{O}} = 15,8$ мбар с базой интерферометра Фабри–Перо $t = 1$ мм

ОА-измерения коэффициентов нерезонансного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм комнатным воздухом и смесью водяного пара с азотом проводились по методике, используемой ранее в работах [17, 18] для измерения сечений поглощения излучения йодного лазера молекулярными компонентами атмосферного воздуха (CO_2 , CH_4 , H_2O). Когда давление ушряющего газа много больше парциального давления поглощающего газа при фиксированном общем давлении смеси, чувствительность ОА-спектрометра не зависит от парциального давления поглощающего газа [17, 18], а амплитуда сигнала ОА-спектрометра пропорциональна концентрации поглощающего газа для любой длины волны излучения. Поэтому, снимая зависимость сигнала ОА-спектрометра от концентрации поглощающего газа, по наклону этой зависимости и после калибровки ОА-спектрометра можно легко получить искомые данные о коэффициенте поглощения излучения с заданной длиной волны исследуемой газовой смесью.

Калибровка ОА-спектрометра осуществлялась по известному поглощению излучения водяным паром в центре линии поглощения H_2O 694,380 нм.

Для случая некогерентного излучения амплитуда сигнала ОА-детектора U определяется интегралом свертки функций, описывающих форму спектрального распределения коэффициента поглощения и спектрального распределения энергии лазерного импульса [9]:

$$U = \alpha \int_{\Delta\lambda} k(\lambda_0) g(\lambda, \lambda_0) E(\lambda_1) f(\lambda, \lambda_1) d\lambda, \quad (1)$$

где α – чувствительность ОА-спектрометра, В·см·Дж $^{-1}$; $g(\lambda, \lambda_0)$ – форма спектрального распределения коэффициента поглощения; $f(\lambda, \lambda_1)$ – форма спектрального распределения энергии лазерного импульса, удовлетворяющая условию нормировки:

$$\int_{\Delta\lambda} E(\lambda_1) f(\lambda, \lambda_1) d\lambda = E, \quad (2)$$

E – энергия лазерного импульса; $\Delta\lambda$ – область длин волн излучения лазерного импульса.

Поскольку при общем давлении смеси $P_{\text{общ}} \approx 1$ бар столкновительная ширина линии поглощения H_2O примерно в 4–5 раз больше доплеровской ширины, то форма спектрального распределения коэффициента поглощения близка к функции Лоренца (g_L). Спектр излучения импульса лазера на рубине, регистрируемый в эксперименте с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой $t = 30$ мм, состоит из одной компоненты. Распределение энергии в спектре с высокой точностью описывается функцией Гаусса (f_G) с шириной на полувысоте $\delta\lambda \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ нм. С учетом вышесказанного выражение (1) можно представить в виде:

$$\alpha^{-1} = (E/U) \int_{\Delta\lambda} k(\lambda_0) g_L(\lambda, \lambda_0) f_G(\lambda, \lambda_1) d\lambda. \quad (3)$$

Интеграл в (3) является коэффициентом поглощения, искаженным аппаратной функцией спектрометра $f_G(\lambda, \lambda_1)$. Далее в статье эту величину будем называть эффективным коэффициентом поглощения и определим следующим образом:

$$k_{\text{эф}} = U/\alpha E. \quad (4)$$

Расчеты авторов показали, что при изменении длины волны излучения в области измерения коэффициента нерезонансного поглощения $\lambda = (694,300 \pm \pm 0,001)$ нм, где его изменение не превышает 1%, $k_{\text{эф}}$ с высокой степенью точности совпадает с истинным значением коэффициента поглощения. Образец записи (U/E) в зависимости от относительного сдвига длины волны, полученный при использовании интерферометра Фабри–Перо с базой $t = 30$ мм, представлен на рис. 3.

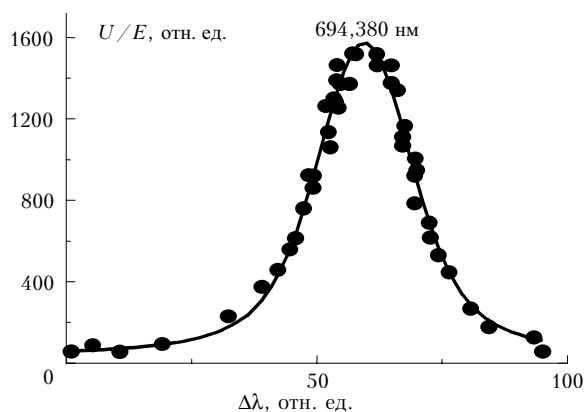


Рис. 3. Контур линии поглощения водяного пара 694,380 нм при $P_{\text{общ}} = 270$ мбар и $P_{\text{H}_2\text{O}} = 14,7$ мбар. Измерения выполнены с базой интерферометра Фабри–Перо $t = 30$ мм. Кружки – эксперимент, линия – контур Фойгта

Таким образом, после измерения величины (U_{max}/E) и расчета эффективного коэффициента поглощения в максимуме линии для нескольких значений влажности газовой смеси можно с наилучшей точностью для данной методики измерений получить

значение для чувствительности ОА-спектрометра. После измерений значения (U/E) для нескольких значений влажности в случае нерезонансного поглощения с использованием формулы (4) можно легко определить значение коэффициента нерезонансного поглощения.

Методика расчета коэффициентов поглощения

Расчет коэффициентов молекулярного поглощения проводился прямым методом (line-by-line) с использованием пакета программ [19] и базы спектральных данных HITRAN-96 [11]. Коэффициент поглощения определялся как сумма вкладов от линий, расположенных в диапазоне длин волн $\lambda \approx (694 \pm 25)$ нм:

$$k(\lambda) = \sum_{ij} S_{ij} f(\lambda_{ij} - \lambda) P_j, \quad (5)$$

где λ_{ij} , S_{ij} – центр и интенсивность i -й линии j -го газа; P_j – парциальное давление j -го газа; $f(\lambda_{ij} - \lambda)$ – функция, описывающая форму контура линии поглощения. Форма линии поглощения вблизи центра описывается лоренцевским контуром, а при отстройке от резонансной частоты, обычно на величину 3–5 см^{-1} , наблюдаются отклонения от данного контура. Поэтому на практике при моделировании широко используется разделение коэффициента поглощения на селективный, который рассчитывается по формуле (5), и континуальный коэффициент поглощения, обязанный своим происхождением далеким нелоренцевским крыльям. В этом случае коэффициент молекулярного поглощения представляют в виде

$$k(\lambda) = k_c(\lambda) + k_k(\lambda), \quad (6)$$

где k_c , k_k – селективный и континуальный коэффициенты поглощения.

Для расчета коэффициента континуального поглощения применялась модель SKD0 [12], которая в спектральном диапазоне от 1 до 5 мкм позволила получить хорошее согласие результатов при сопоставлении экспериментально измеренных спектров солнечной радиации с расчетными данными [20].

В базе данных HITRAN-96 значение ширины линии поглощения H_2O с центром $\lambda_0 = 694,380$ нм приводится с погрешностью 5–10%, а погрешность интенсивности линии более 20%.

Для того чтобы снизить погрешность калибровки ОА-спектрометра, в настоящей работе использовались данные об интенсивности и коэффициентах столкновительного уширения азотом и воздухом линии с центром $\lambda_0 = 694,380$ нм, которые были измерены с помощью спектрофотометра с разрешением 10^{-3}см^{-1} [15]. С учетом данных [15] погрешность расчета величины эффективного коэффициента поглощения в максимуме линии поглощения не превышает 16%.

Результаты последующего моделирования показали, что поглощение в центре линии, рассчитанное по данным [15], примерно на 20% меньше по сравнению

с результатами расчета, выполненного с использованием данных HITRAN-96.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлена зависимость измеряемой величины (U^{\max}/E) в центре линии поглощения H_2O 694,380 нм от величины рассчитанного с использованием данных работы [15] эффективного коэффициента

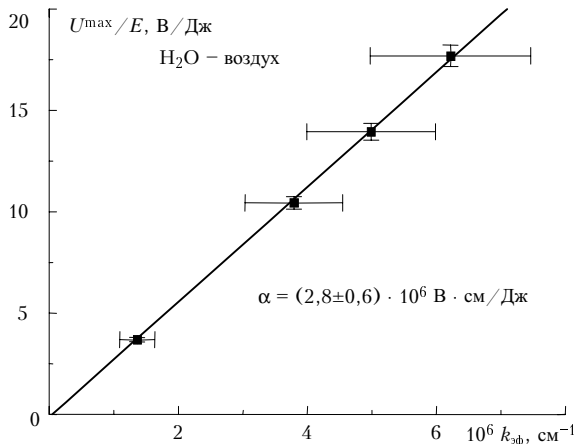


Рис. 4. Зависимость сигнала ОА-спектрометра (U^{\max}/E) от величины эффективного коэффициента поглощения. Измерения (U^{\max}/E) и расчет $k_{\text{эф}}$ выполнены для максимума линии поглощения H_2O 694,380 нм при общем давлении смеси водяного пара с комнатным воздухом $P_{\text{общ}} = 1005$ мбар и температуре $T = 298$ К

поглощения в максимуме линии для смесей H_2O с комнатным воздухом. На рис. 5 и 6 представлены зависимости коэффициентов нерезонансного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм бинарными смесями H_2O с комнатным воздухом и азотом от парциального давления водяного пара, а также результаты расчетов коэффициентов нерезонансного поглощения с учетом и без учета континуального поглощения излучения водяным паром.

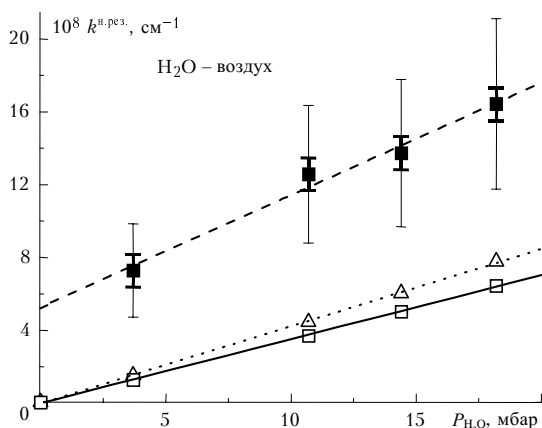


Рис. 5. Коэффициент поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм атмосферным воздухом при давлении $P_{\text{общ}} = 1005$ мбар и температуре $T = 298$ К в зависимости от влажности воздуха: ■ – эксперимент; Δ – расчет с учетом континуального поглощения H_2O ; \square – расчет без учета континуума H_2O

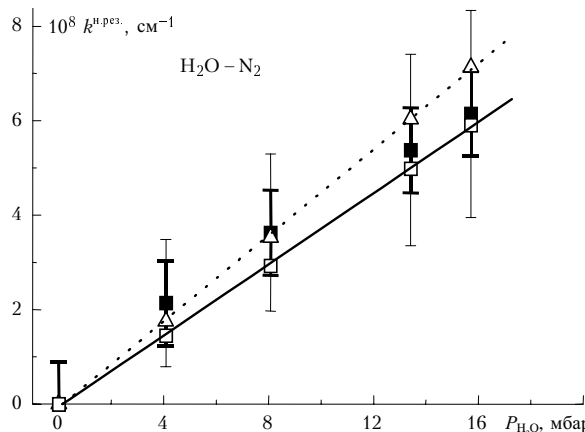


Рис. 6. Коэффициент поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм смесью H_2O с азотом при давлении $P_{\text{общ}} = 945$ мбар и температуре $T = 298$ К в зависимости от парциального давления H_2O : ■ – эксперимент; Δ – расчет с учетом континуального поглощения H_2O ; \square – расчет без учета континуума H_2O

Графики были получены следующим образом.

Лазер на рубине настраивали в резонанс с линией поглощения H_2O 694,380 нм, чему соответствовало достижение максимального значения U^{\max} амплитуды ОА-сигнала, регистрируемого на экране осциллографа С9-16. Характерная форма сигнала представлена на рис. 7 (кривая 1). Затем производили откачку газа

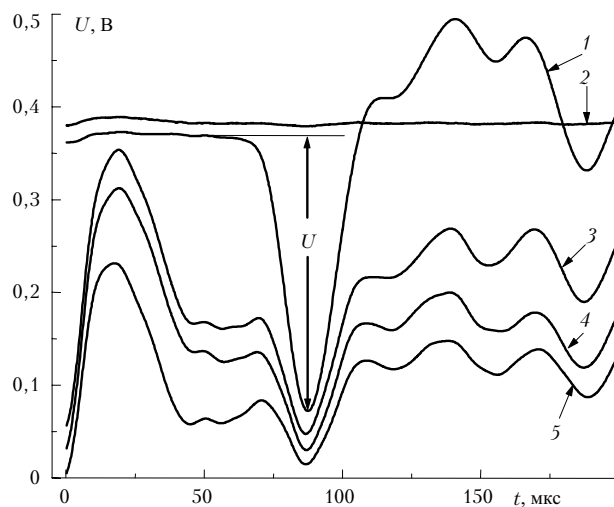


Рис. 7. Временная развертка сигналов ОА-детектора: кривая 1 – сигнал для излучения, резонансного с линией поглощения H_2O 694,380 нм; кривые 2–5 – сигналы для нерезонансного излучения с длиной волны 694,300 нм; 1, 2 – отклики ОА-детектора на один лазерный импульс; 3–5 – суммы 25 ОА-сигналов

из ячейки ОА-детектора и неоднократно «промывку» ячейки азотом до тех пор, пока амплитуда ОА-сигнала U^{\max} не уменьшалась до нуля. Окончательную откачку газа из ячейки осуществляли до давления $P_{\text{общ}} \leq 0,03$ мбар. Затем в ячейку ОА-детектора последовательно напускали определенное количество водяного пара из баллона с дистиллированной водой

в жидкой фазе и воздух из комнаты. Окончательное давление смеси газов в ячейке было равно атмосферному давлению.

Изменяя длину волны излучения лазера на рубине от импульса к импульсу, проводили запись спектрального распределения величины (U/E) (см. рис. 3) и определяли значение (U^{\max}/E). Затем лазер настраивали на длину волны $\lambda = 694,300$ нм и проводили измерения величины (U/E) для случая нерезонансного поглощения. Форма ОА-сигнала нерезонансного поглощения излучения лазера на рубине водяным паром в смеси с воздухом представлена на рис. 7 кривой 2. Поскольку в случае нерезонансного поглощения амплитуда полезного ОА-сигнала всего лишь в несколько раз превышала уровень шума, то для увеличения отношения сигнал-шум в 5 раз производилось накопление 25 ОА-импульсов в памяти цифрового осциллографа С9-16 (см. рис. 7, кривые 3–5). Такая процедура измерений ОА-сигналов резонансного и нерезонансного поглощения осуществлялась для нескольких значений влажности комнатного воздуха.

По результатам измерения сигналов резонансного поглощения была построена зависимость величины (U^{\max}/E) от эффективного коэффициента поглощения (см. рис. 4). Из этой зависимости определялась чувствительность спектрометра α . (В экспериментах с водяным паром и комнатным воздухом значение чувствительности составило величину $\alpha = (2,8 \pm 0,6) \cdot 10^6$ В·см/Дж. Затем значение α использовалось для определения коэффициента нерезонансного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм комнатным воздухом и его зависимости от парциального давления водяного пара (см. рис. 5).

Аналогичные измерения были выполнены для смеси H_2O с азотом.

Погрешность измерения коэффициента нерезонансного поглощения включает в себя погрешность калибровки ОА-спектрометра и погрешность измерения величины (U/E) для излучения с длиной волны 694,300 нм в относительных единицах. В свою очередь, погрешность калибровки включает в себя погрешность расчета эффективного коэффициента поглощения в максимуме линии поглощения H_2O 694,380 нм и погрешности измерения величины (U^{\max}/E). Погрешность расчета эффективного коэффициента поглощения в максимуме линии для используемой в эксперименте смеси водяного пара с воздухом или азотом состоит из погрешности, с которой получены исходные спектроскопические данные ($\leq 16\%$) [15], и погрешности измерения концентрации H_2O в смесях. Измерения концентрации водяного пара в смесях с азотом производились с помощью масляного манометра с погрешностью, которая не превышала 2%. В экспериментах с воздухом к этой погрешности необходимо добавить погрешность измерения влажности комнатного воздуха с помощью аспирационного психрометра Ассмана, которая составляла величину 2%. На рис. 4 погрешность расчета эффективного коэффициента поглощения представлена доверительными интервалами по оси X.

В силу того что амплитуды ОА-сигналов U^{\max} и E на 2 – 3 порядка превышали уровни шумов, то погрешность относительных измерений величины (U^{\max}/E) определяется паспортными данными осциллографов С9-16 и С9-8 и не превышает 3%. На рис. 4 эта погрешность представлена доверительными интервалами по оси Y. Таким образом, результирующая погрешность калибровки ОА-спектрометра не превышает 21% для смесей H_2O с азотом и 23% для смесей H_2O с воздухом.

При измерениях величины U/E , соответствующей слабому нерезонансному поглощению, основным источником погрешности является уровень шума ОА-детектора. В эксперименте на фоне шума начинал выделяться сигнал, имеющий амплитуду $U = 4 \div 5$ мВ. Таким образом, для оценки погрешностей можно рассматривать уровень шума величиной $\pm 2,5$ мВ. Исходя из данного значения уровня шума, были рассчитаны погрешности измерения коэффициентов нерезонансного поглощения в относительных единицах с учетом накопления 25 импульсов, которые не зависят от концентрации водяного пара (амплитуды сигнала поглощения). На рис. 5 и 6 эти погрешности представлены «жирными» отрезками. Суммарные погрешности измерения коэффициентов нерезонансного поглощения представлены на рис. 5 и 6 доверительными интервалами в виде тонких отрезков. Из рис. 5 и 6 видно, что при нулевой погрешности определения постоянной калибровки спектрометра минимальный, измеряемый в настоящей работе, коэффициент поглощения составляет величину $k_{\lambda}^{\min} \leq 10^{-8}$ см $^{-1}$.

Для наглядности все сигналы, представленные на рис. 7, разнесены по шкале ординат. Анализ сигналов показывает, что в случае нерезонансного поглощения (кривые 3–5) ОА-сигналы по форме очень близки к ОА-сигналу резонансного поглощения (кривая 1) начиная с момента времени $t = 50$ мкс, что указывает на одну и ту же природу возникновения сигналов (поглощение излучения исследуемой смесью газов). В то же время при $t < 50$ мкс во временной развертке ОА-сигналов нерезонансного поглощения четко регистрируется сигнал положительной полярности (кривые 3–5), слабо выраженный на фоне большого по амплитуде отрицательного ОА-сигнала резонансного поглощения (кривая 1) отрицательной полярности.

Не будем детально останавливаться на причинах и механизме генерации этого сигнала. Отметим только, что экспериментально было установлено, что сигнал положительной полярности связан с рассеянием излучения как окнами ячейки, так и исследуемым газом.

Результаты проведенного моделирования показали, что в рассматриваемом спектральном интервале вклад континуума в общее поглощение сравнительно невелик. Для излучения с длиной волны $\lambda = 694,300$ нм его вклад составляет примерно 20% и не выходит за пределы погрешностей эксперимента (см. рис. 5 и 6), а для центра линии поглощения $\lambda_0 = 694,380$ нм, используемой для калибровки ОА-спектрометра, его вклад пренебрежимо мал (см. рис. 2а).

Рис. 6 показывает, что результаты измерений коэффициентов нерезонансного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм бинарными смесями водяного пара с азотом в пределах погрешности измерений совпадают с результатами расчетов коэффициентов поглощения, выполненных с учетом и без учета континуального поглощения излучения водяным паром. Поэтому вопрос об истинной величине континуального поглощения в данном спектральном интервале и его роли в ослаблении коротковолнового излучения атмосферой остается открытым. Для ответа на этот вопрос необходимо на порядок повысить чувствительность спектрометра и уменьшить суммарную погрешность получения спектроскопических данных, используемых для калибровки спектрометра, до величины $\leq 5\%$.

В то же время рис. 5 показывает, что для смесей водяного пара с комнатным воздухом данные о коэффициенте поглощения, полученные из эксперимента, превышают данные расчетов коэффициента поглощения, выполненных как с учетом, так и без учета континуума водяного пара. Различие между данными эксперимента и расчетов, выполненных с учетом континуума H_2O , увеличивается с ростом влажности воздуха от $5,8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ при $P_{H_2O} = 3,8$ мбар до $8,6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ при $P_{H_2O} = 18,2$ мбар и превышает погрешности абсолютных измерений.

Полученные в настоящей работе результаты согласуются с данными работы [1] и подтверждают правоту сделанного в [1] заключения о наличии в атмосферном воздухе некой субстанции, являющейся источником избыточного поглощения коротковолнового излучения в атмосфере, отличного от молекулярного поглощения.

В [1] показано, что наиболее вероятным источником избыточного поглощения коротковолнового излучения в атмосфере может быть мелкодисперсный сажевый аэрозоль. Поэтому в дальнейшем планируем провести измерения коэффициентов нерезонансного поглощения видимого излучения атмосферным воздухом в зависимости от концентрации в нем мелкодисперсного сажевого аэрозоля.

Заключение

Модернизация ОА-спектрометра с моноимпульсным лазером на рубине и совершенствование методики измерений позволили достичь пороговой чувствительности спектрометра по коэффициенту поглощения $k_{\lambda}^{\text{min}} \leq 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. С помощью спектрометра проведены измерения коэффициентов слабого нерезонансного поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300$ нм бинарными смесями водяного пара с азотом и атмосферным (комнатным) воздухом в зависимости от концентрации в них водяного пара. Измерения выполнены при давлении газов в ОА-ячейке $P_{\text{общ}} \approx 1$ бар.

Полученные результаты подтверждают правоту сделанного другими авторами заключения о

наличии в атмосферном воздухе некой субстанции, являющейся источником избыточного поглощения коротковолнового излучения в атмосфере, отличного от молекулярного поглощения.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.А. Пхалагову за полезные консультации и плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-05-64564).

1. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. К вопросу о непрерывном ослаблении оптического излучения в коротковолновой области спектра // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 4. С. 315–319.
2. Chen H., Lu D. An explanation for anomalous absorption of solar radiation by water clouds // Proc. of the International Radiation Symposium IRS – 96: Current Problems in Atmospheric Radiation, Fairbanks, Alaska. 1996. P. 1042–1045.
3. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Мельникова И.Н. Поглощение солнечной радиации облачной и безоблачной атмосферой // Метеорол. и гидрол. 1996. № 2. С. 14–23.
4. Tomasi C., Guzzi R., and Vittori O. A search for e-effect in the atmospheric water vapor continuum // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 255–260.
5. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. Аэрозольное поглощение оптического излучения в атмосфере аридной зоны // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 10. С. 1318–1329.
6. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. Аэрозольное ослабление оптического излучения в летних дымках Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 720–726.
7. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Поглощение водяным паром в близкой инфракрасной области и некоторые геофизические следствия // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 131–135.
8. Несмелова Л.И., Пхалагов Ю.А., Родимова О.Б., Творогов С.Д., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. К вопросу о природе атмосферного аномального поглощения коротковолновой радиации // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 288–293.
9. Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н., Тихомиров Б.А. Нелинейная оптико-акустическая спектроскопия молекулярных газов. Новосибирск: Наука, 1987. 128 с.
10. Пулипович В.А., Ковалев А.А. Оптические квантовые генераторы с просветляющимися фильтрами. Минск: Наука и техника, 1975. 216 с.
11. Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A., Massie S.T., Edwards D.P., Flaud J.-M., Perrin A., Camy-Peyret C., Dana V., Mandin J.-Y., Schroeder J., McCann M., Gamache R.R., Wattson R.B., Yoshino K., Chance K.V., Jucks K.W., Brown L.R., Nemtchinov V., Varanasi P. The hitran molecular spectroscopic database and hawks (hitran atmospheric workstation): 1996 edition // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1998. V. 60. № 6. P. 665–710.
12. Clough S., Kneizis F., Davies R. Line shape and the water vapor continuum // Atmos. Res. 1989. № 23. P. 229–241.
13. Long R.K. Atmospheric absorption of laser radiation. Ohio State Univ. Engineering Publication Bull. № 199. Columbus, Ohio. 1966. 24 p.

14. *Johnson M.M., La Grone A.H.* Determination of atmospheric water vapor densities from measurements of the 6943.8 Å line // *Radio Sci.* 1973. V. 8. № 5. P. 407–410.
15. *Тырыйкин И.С.* Исследование уширения линий атмосферного водяного пара в видимом диапазоне методом лазерной спектроскопии высокого разрешения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 1983. 19 с.
16. *Тихомиров Б.А., Пономарев Ю.Н., Долгих В.А.* Измерение параметров линий поглощения атмосферного водяного пара 694,215 нм, 694,237 нм и 694,380 нм // *Ж. прикл. спектроскопии.* Т. 34. Вып. 4. С. 653–656.
17. *Bragg S.L., Lawton S.A., Wiswall C.E.* Absolute measurements of absorption at the iodine-laser frequency in atmospheric gases // *Opt. Lett.* 1985. V. 10. № 7. P. 321.
18. *Коротченко Е.А., Куров А.Ю., Николаев В.Д., Пономарев Ю.Н., Свистун М.И., Тихомиров Б.А.* Измерение сечения поглощения водяного пара на частоте генерации йодного лазера // *Оптика атмосф.* 1988. Т. 1. № 1. С. 139–141.
19. *Мицель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М., Фомин Б.А.* Эффективный метод полинейного счета пропускания поглощающей атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1995. Т. 8. № 10. С. 1547–1548.
20. *Brown P.D., Ciough S.A., Mlawer E.J., Ghipper T.R., Murcray F.J.* High resolution validation in the Shortwave: ASTI/LBLRTM QME // *Proc. of the Eighth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, Tuscon, Arisona.* 1998. P. 101–108.

В.А. Тихомиров, А.В. Тихомиров and К.М. Фирсов. Non-resonance absorption of the ruby laser radiation by the atmospheric air and H₂O-nitrogen mixture.

Coefficients of the weak non-resonance absorption of the pulse ruby laser radiation ($\lambda = 694.300$ nm) by binary mixtures of water vapor with atmospheric air and nitrogen were first measured using time resolved photoacoustic technique. The results of present study confirm the conclusion of other authors about existence of some substance as a source of the excess absorption of short-wave radiation in the atmospheric air distinct from the molecular absorption.