

В.А. Капитанов, Ю.Н. Пономарев, И.С. Тырышкин

ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК- И ВИДИМОГО ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА В МИКРООКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Приведены оценки абсолютных сечений поглощения воздуха и водяного пара на лазерных длинах волн в диапазоне 0,53 – 1,06 мкм. Измерения выполнены в контролируемых условиях на лазерных спектрофотометрах с длинноволновыми кюветами и на высокочувствительных оптико-акустических лазерных спектрометрах.

Введение

Проблема аномального поглощения коротковолнового излучения в облаках достаточно широко обсуждается в литературе в связи с построением климатических моделей, и одна из гипотез связана с влиянием континуального поглощения водяным паром. Кроме того, измерения ослабления оптического излучения с широким спектром в диапазоне 0,4 ÷ 2,5 мкм [1, 2] на открытых атмосферных трассах после исключения вкладов аэрозольного ослабления (измерения при больших дальностях видимости) и селективного поглощения (на основе имеющихся банков спектральных линий) показали прямо пропорциональную зависимость величины ослабления от концентрации водяного пара, что позволило авторам оценить величину сечения континуального поглощения.

Измерения же в лабораторных условиях, когда состав, температура и давление газовой среды контролируются, а аэрозольный компонент отсутствует, позволяют получить более надежные количественные результаты по неселективному поглощению оптического излучения молекулярными компонентами атмосферы в микроокнах прозрачности.

В настоящей статье сведены результаты измерений коэффициентов поглощения воздухом лазерного излучения на отдельных длинах волн (или в отдельных спектральных интервалах) диапазона 0,5 – 1,35 мкм. Эти измерения выполнены высокочувствительными методами лазерной спектрофотометрии и лазерной оптико-акустической спектроскопии.

Экспериментальная техника и методика измерений

Измерения сечений континуального поглощения в газах оптико-акустическим методом в значительной степени затруднены тем обстоятельством, что не зависящий от частоты источника излучения сигнал оптико-акустического детектора (ОАД) U обусловлен, в равной степени, как континуальным поглощением в газе $U_{\text{конт}}$, так и поглощением проходящего и рассеянного излучения окнами и стенками ячейки ОАД U_{ϕ} [3].

Уровень фонового сигнала U_{ϕ} для большинства конструкций ОАД достаточно велик, и величина эквивалентного коэффициента поглощения

$$K_{\phi} = U_{\phi}/(\alpha W) \geq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$$

(α – чувствительность ОАД, В/(Вт · см⁻¹); W – мощность излучения, Вт) значительно превосходит пороговую чувствительность ОАД по коэффициенту поглощения $K_{\text{пор}}(\nu) = \sqrt{U_{\text{ш}}^2}/(\alpha W) \geq 3 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ [3, 4] ($U_{\text{ш}}^2$ – среднеквадратичная величина шума, В²).

В общем случае U как функцию частоты излучения ν , см⁻¹, общего давления в ячейке ОАД P , Торр, и плотности поглощающих молекул N , мол/см³, можно представить в виде

$$U = \alpha W [\sigma_{\text{сел}}(\nu, P) N + \sigma_{\text{конт}}(P) N + K_{\phi}(P)], \tag{1}$$

где $\sigma_{\text{сел}}(\nu, P)$ и $\sigma_{\text{конт}}(P)$ – сечения селективного и континуального поглощений, см².

При постоянном давлении смеси в ячейке ОАД, $P = 0,5 \div 1$ атм (давление буферного газа много больше давления поглощающего газа) сигнал ОАД U линейно зависит от плотности поглощающих молекул N и тангенс угла наклона функции $U(N)$ пропорционален сумме сечений селективного и континуального поглощений $[(\sigma_{\text{сел}}(\nu, P) + \sigma_{\text{конт}}(P))]$. При использовании узкополосных перестраиваемых лазеров вклад селективного поглощения может быть уменьшен выбором соответствующего участка спектра, вдали от линий поглощения, а в случае неперестраиваемых лазеров учтен на основе имеющихся спектров высокого разрешения.

Описанная методика позволяет исключить фоновый сигнал и обеспечить измерения континуального поглощения с пороговой чувствительностью на уровне $3 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$.

Измерения сечений континуального поглощения водяного пара проводились с использованием оптико-акустических спектрометров с лазерами на рубине ($0,6942 \div 0,6944$ мкм) и красителях ($0,587 \div 0,597$ мкм).

Подробное описание спектрометров, принципы их работы, а также методики калибровки и измерений приведены в [3, 4]. Во всех проведенных сериях измерений не удалось зарегистрировать зависимость сигнала ОАД от концентрации водяного пара. На рис. 1 приведен спектр поглощения влажного и осушенного воздуха.

Лазерные спектрофотометры с длинноволновыми 30- и 110-метровой кюветами [5] использовались для измерения абсолютных значений поглощения воздуха на длинах волн генерации следующих источников излучения: Nd:YAG-лазера (1,064 мкм) и его 2-й гармоники (0,532 мкм), рубинового лазера (0,69 мкм), лазера на парах меди (0,52; 0,57 мкм).

Ширина спектра излучения ($\Delta\nu$) лазеров на гранате и парах меди не превышала $0,01 \text{ см}^{-1}$. У лазера на рубине, который перестраивался по частоте в пределах $\sim 10 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu \leq 10^{-3} \text{ см}^{-1}$.

Атмосферный воздух напускали в кювету по трубопроводу через фильтр непосредственно из атмосферы. Влажность воздуха измерялась аспирационным психрометром типа МВ-4м. Измерения проводились при парциальных давлениях паров воды в воздухе от 5 до 15 Торр. В случае если парциальное давление паров воды в воздухе было меньше заданного, перед поступлением воздуха в кювету напускали пары воды по методике, описанной в [5], с таким расчетом, чтобы общее парциальное давление паров равнялось заданному. Фильтр для очистки воздуха представляет собой контейнер, заполненный гигроскопической ватой толщиной слоя ~ 2 см. С обеих сторон слоя ваты расположены двухслойные прокладки из батиста.

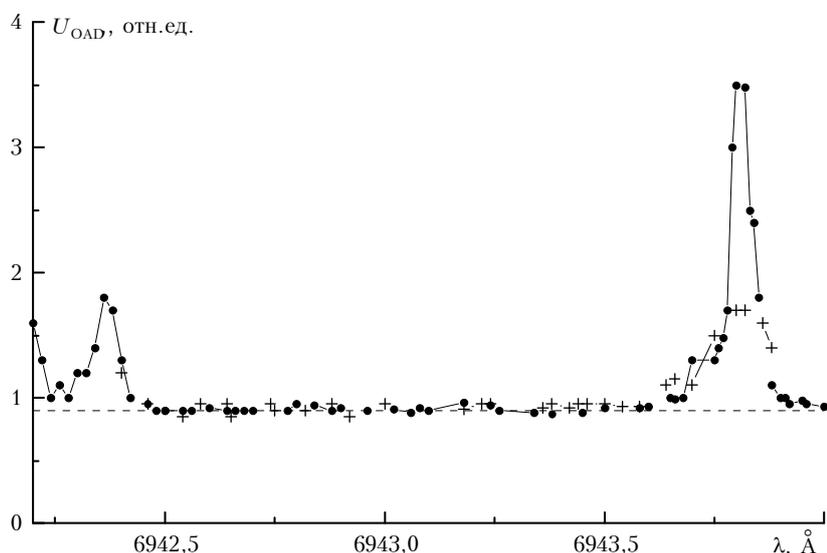


Рис. 1. Спектр поглощения атмосферного воздуха в области температурной перестройки рубинового лазера. $P = 300$ мм рт. ст.; • – $N_{\text{H}_2\text{O}} = 5,5 \text{ г/м}^3$; + – осушенный воздух; штриховая линия – уровень фона

Величина пропускания исследуемого газа определяется из выражения

$$T = (I^{\text{вх}} / I^{\text{вх}}) / (I_0^{\text{вх}} / I_0^{\text{вх}}), \quad (2)$$

где индексы «вых», «вх» соответствуют значениям интенсивности на выходе из кюветы и на входе в нее, а 0 – измерениям тех же величин при полном отсутствии газа в кювете. Коэффициент поглощения определяется по закону Бугера.

Используемые системы регистрации интенсивности на входе и выходе кюветы, а также достигнутые значения оптического пути ≤ 4 км позволяли регистрировать значения коэффициентов поглощения $K_{\text{конт}} \geq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$.

Измерения показали, что при отстройке длины волны излучения рубинового лазера от центра линии поглощения водяного пара ($\lambda = 694,38$ нм) на 5 и более полуширин, а также на длинах волн перечисленных лазеров величина пропускания кюветы не зависит от парциального давления водяного пара.

Пороговая чувствительность по коэффициенту поглощения оптико-акустических спектрометров и спектрофотометров значительно меньше, чем 10^{-7} см^{-1} , и поскольку во всех сериях измерений не зарегистрирована зависимость поглощения или пропускания от концентрации водяного пара, то можно считать величину сечений континуального поглощения водяного пара $\sigma_{\text{конт}} \leq 0,010 \text{ Г}^{-1} \cdot \text{см}^2$.

Полученные оценки величин сечений поглощения для всех используемых длин волн в сравнении с [1, 2] приведены на рис. 2 и примерно в 2 раза меньше значений, приведенных в [2], а полученная в [2] прямо пропорциональная зависимость ослабления излучения от концентрации водяного пара, на наш взгляд, не может быть объяснена только влиянием континуального поглощения водяного пара.

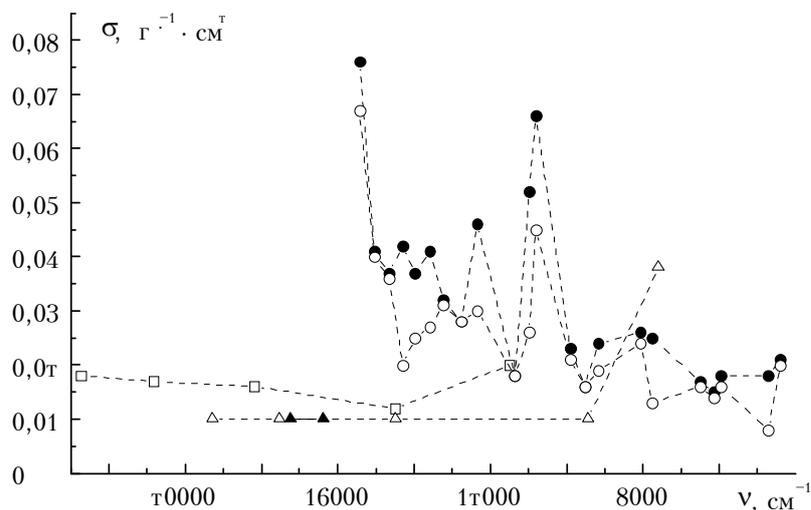


Рис. 2. Сечение поглощения для атмосферного воздуха: • – [1]; ○ – [1] с учетом селективного поглощения; □ – [2]; Δ – наши данные

Настоящая работа финансировалась за счет Программы поддержки ведущих научных школ России (грант N 96–15–98476).

1. Tomasi C., Guzzi R., Vittory O. // J. Atm. Sci. 1974. V. 31. P. 255–260.
2. Panchenko M.V., Zuev V.E., Tworogov S.D., Uzhegov V.N., Nesmelova L.I., Phalagov Yu.A., Rodimova O.B., Shchelkanov N.N. // ARM / CHAMMP Science Team Meeting. San Antonio. Texas. 1997.
3. 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.
4. Бондарев Б.В., Капитанов В.А., Кобцев С.М., Пономарев Ю.Н. // Оптика атмосферы. Томск, 1988. Т. 1. № 10. С. 18–24.
5. Арёфьев В.Н., Лопасов В.П., Макогон М.М., Синица Л.Н., Солодов А.М., Тыршкин И.С. Прикладная спектроскопия атмосферы. Томск, 1988. 262 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
21 июля 1997 г.

V. A. Kapitanov, Yu. N. Ponomarev, I. S. Tyryshkin. Absorption of Air and Water Vapor in Transmittance Microwindows of Near IR and Visible Spectral Ranges.

Absolute cross-sections of the air and water vapor absorption are estimated at laser wavelengths from 0.53 to 1.06 μm . The measurements were conducted under controllable conditions using laser spectrophotometers with long-base cells and highly sensitive photoacoustic laser spectrometers.