

Н.Н. Щелканов, Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужegov

**ИССЛЕДОВАНИЕ КONTИНУАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА
В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ В ОБЛАСТИ 10,6 МКМ**

Представлены результаты натуральных исследований континуума водяного пара в области 10,6 мкм. Получены параметры подгонки аппроксимационного выражения, которое используется для расчета коэффициентов континуального поглощения. Положительная температурная зависимость линейного члена коэффициента континуального поглощения составила $+0,97 \dots +1,05\% \cdot \text{град}^{-1}$ в диапазоне температур 285–308 К, а отрицательная температурная зависимость квадратичного члена — $-2,1 \dots -2,4\% \cdot \text{град}^{-1}$.

Изучению закономерностей континуального поглощения оптического излучения парами воды в окне относительной прозрачности атмосферы 8–13 мкм посвящено достаточно много экспериментальных исследований, проведенных на наклонных и горизонтальных трассах, в натуральных условиях и лабораторных кюветах [1–13]. Анализ этих работ позволяет выявить общие закономерности континуума — нелинейную зависимость коэффициента континуального поглощения (α_k) от парциального давления водяного пара (или абсолютной влажности воздуха) и отрицательную зависимость α_k от температуры. В то же время имеются заметные различия в значениях коэффициентов континуального поглощения. Критический обзор последних репрезентативных данных по континууму водяного пара [14] выявил ряд факторов, которые приводили к искажению результатов определения α_k . К этим факторам при исследованиях на реальных атмосферных трассах относятся: трудность правильного учета селективного поглощения водяным паром и атмосферными газами (CO_2 , O_3 , NH_3 и др.); наличие аэрозольного ослабления и его зависимости от относительной влажности воздуха; возможные неточности в измерении распределения температуры и водяного пара по трассе; проблемы при калибровке прибора.

Используя опыт предшествующих исследований, в настоящей статье проведено выделение вклада континуального поглощения водяного пара из общего ослабления в области 10,6 мкм. В качестве исходного материала использовались данные по пропусканию оптического излучения в 15 участках видимого в ИК-диапазонах спектра, полученные в аридной зоне Казахстана в апреле–октябре 1986–1987 гг., на измерительной трассе длиной 4,63 км, с помощью аппаратного комплекса [15]. Участки спектра выделялись интерференционными светофильтрами, в комплекте с обрезавшими цветными стеклами, с центрами на следующих длинах волн (λ): 0,44; 0,48; 0,55; 0,63; 0,69; 0,87; 0,94; 1,06; 1,22; 1,6; 2,17; 3,97; 9,2; 10,6 и 11,5 мкм. Полуширина фильтров в области 0,44 ... 2,17 мкм составляла 0,01 ... 0,02 мкм, в области 3,97 ... 11,5 мкм — 0,15 ... 0,30 мкм. Величина случайной погрешности вычисления коэффициентов общего ослабления ($\epsilon(\lambda)$) в диапазоне $\lambda = 0,44 \dots 11,5$ мкм оказалась равной $\sim 0,005 \text{ км}^{-1}$. Коэффициенты аэрозольного ослабления ($\alpha_a(\lambda)$) в области 0,44 ... 3,97 мкм находились по методике [16]. В области спектра 0,44 ... 1,06 мкм вычиталось молекулярное рассеяние, в области 1,06 ... 3,97 мкм — молекулярное поглощение парами воды и атмосферными газами.

Важными обстоятельствами, определяющими возможность выявления зависимости континуума водяного пара от метеопараметров атмосферы, являются диапазоны изменчивости последних. В этом смысле диапазоны абсолютной влажности воздуха — от 1 до 19 г/м³, температуры — от 263 до 308 К и относительной влажности — от 25 до 95%, реализовавшиеся в эксперименте, позволили провести исследование α_k от абсолютной влажности и температуры воздуха. Вследствие слабой изменчивости общего атмосферного давления исследования зависимости континуума от этого параметра не проводилось. Среднее значение общего давления составило 0,967 атм. Метеорологическая дальность видимости изменялась от 30 до 200 км.

Экспериментально измеренный коэффициент общего ослабления в области 10,6 мкм можно представить в виде суммы

$$\epsilon = \alpha_k + \alpha_a + \alpha_{c.b} + \bar{\alpha}_{c.r} + \alpha_0 + \delta,$$

где α_k — коэффициент континуального поглощения парами воды; α_a — коэффициент аэрозольного ослабления; $\alpha_{c.b}$ — коэффициент селективного поглощения водяного пара; $\bar{\alpha}_{c.r}$ — среднее значение коэффициента селективного поглощения атмосферными газами (CO_2 , NH_3 , O_3 и др.); α_0 , δ — систематическая и случайная погрешности определения ϵ . При такой записи ϵ вариации $\alpha_{c.r}$ включены в δ . Следует заметить, что для монохроматического излучения $\alpha_{c.b}$ и $\bar{\alpha}_{c.r}$ в строгом понимании не являются коэффициентами поглощения. С этой оговоркой перейдем к описанию методики выделения кон-

тинуального поглощения и изложению критериев отбора спектров $\epsilon(\lambda)$, которые использовались для получения значений α_k .

Определение абсолютной влажности воздуха, усредненной по измерительной трассе, осуществлялось оптическим методом [17]. Для реализации этого метода измерялось пропускание в полосе поглощения водяного пара 0,94 мкм. Синхронно с оптическим проводилось метеорологическое измерение влажности на одном конце трассы. Если разность между влажностями, полученными оптическим и метеорологическим способами, превышала по модулю 0,5 г/м³, то соответствующий спектр $\epsilon(\lambda)$ из дальнейшего анализа исключался. Это позволило уменьшить случайную среднеквадратическую погрешность определения влажности оптическим методом до 0,2 г/м³.

Для получения зависимости α_k от метеопараметров атмосферы использовались спектры коэффициентов общего ослабления с нейтральным ходом $\alpha_a(\lambda)$ в области 0,44 ... 0,87 мкм. Такой критерий отбора спектров выбран в связи с тем, что в этом случае можно пренебречь поглощением субмикронного аэрозоля в области 10,6 мкм. Как известно (см., например, [18]), субмикронная фракция аэрозоля имеет в видимой области спектра ярко выраженный спектральный ход коэффициентов ослабления, который проявляется в уменьшении коэффициентов с ростом длины волны излучения, а грубодисперсная фракция — нейтральный. Тогда в спектрах $\epsilon(\lambda)$, отобранных по вышеуказанному критерию, коэффициент ослабления субмикронным аэрозолем в области 0,44 ... 0,87 мкм не будет превышать величины случайной погрешности определения общего ослабления (0,005 км⁻¹), а коэффициент поглощения субмикронной фракцией аэрозоля в области 10,6 мкм (согласно расчету по однопараметрической модели [19]) — 0,001 км⁻¹.

Учет аэрозольного ослабления грубодисперсным аэрозолем осуществлялся следующим образом. На основе статистических характеристик массивов коэффициентов ослабления в области 1,06 ... 10,6 мкм и метеопараметров атмосферы находились эмпирические модели для вычисления пяти коэффициентов аэрозольного ослабления в области 10,6 мкм [16]

$$\alpha_{ai}(10,6) \sim K_{oi} + K_{ii} \cdot \alpha_i(\lambda_i),$$

где $i = 1, \dots, 5$; $\alpha_i(\lambda)$ — коэффициенты аэрозольного ослабления на длинах волн 1,06; 1,22; 1,6; 2,17; и 3,97 мкм; K_{oi} и K_{ii} — эмпирические константы. Причем для дальнейшего анализа оставались спектры коэффициентов ослабления, для которых разница между максимальной и минимальной модельными оценками аэрозольного ослабления в области 10,6 мкм не превышала 0,01 км⁻¹. Затем по пяти коэффициентам находилось среднее значение аэрозольного ослабления в области 10,6 мкм и оно вычиталось из общего. Использование такого подхода позволило исключить аэрозольное ослабление в области 10,6 мкм со среднеквадратической погрешностью 0,003 км⁻¹.

Для учета селективного поглощения парами воды находилась функция пропускания

$$T_{c.b.}(10,6) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{c.b.}(\lambda) \cdot A(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda) d\lambda,$$

где λ — длина волны излучения; $\lambda_1 = 1035$ мкм, $\lambda_2 = 1085$ мкм; $T_{c.b.}(\lambda)$ — спектральное пропускание селективной компоненты водяного пара на трассе длиной 4,63 км; $A(\lambda)$ — пропускание интерференционного фильтра; $A(\lambda) = 4A_0(\lambda - \lambda_1)$ при $\lambda_1 \leq \lambda \leq 10,6$ мкм; $A(\lambda) = 4A_0(\lambda_2 - \lambda)$ при $10,6 \leq \lambda \leq \lambda_2$; A_0 — пропускание фильтра на $\lambda = 10,6$ мкм. Величина $T_{c.b.}(\lambda)$ рассчитывалась по данным [20]. Коэффициент $\alpha_{c.b.}$ находился по формуле

$$\alpha_{c.b.} = \ln T_{c.b.}(10,6) / L,$$

где L — длина трассы.

Среднее значение коэффициента поглощения атмосферными газами ($\bar{\alpha}_{c.r.}$) исключалось из общего ослабления вместе с систематической погрешностью (α_0). Точность исключения величины $\bar{\alpha}_{c.r.} + \alpha_0$ из $\epsilon(10,6)$ составила примерно 0,005 км⁻¹.

Таким образом, применение критериев отбора, с одной стороны, привело к сокращению экспериментального массива $\epsilon(\lambda)$ с 298 до 65 спектров, а с другой — позволило минимизировать случайную погрешность вычисления α_k .

Зависимость коэффициента континуального поглощения парами воды от метеопараметров атмосферы задавалась в виде [13]

$$\alpha_k(10,6) = k_1 \cdot T^n (1 + k_0 P) a + k_2 \cdot \exp(H/T) a^2, \quad (1)$$

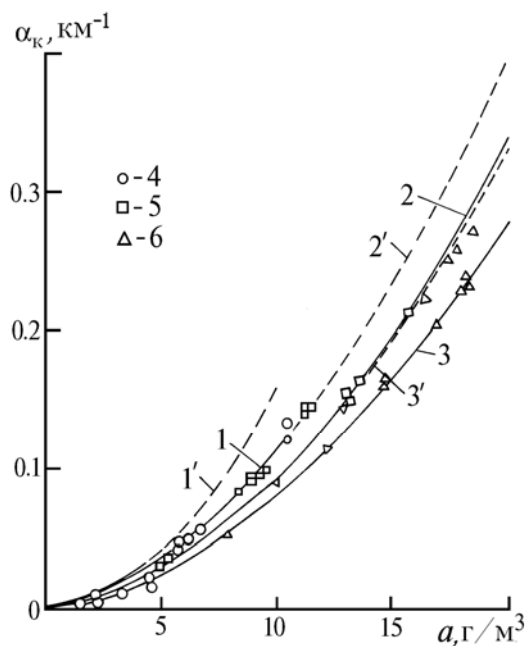
где α_k — коэффициент континуального поглощения, км⁻¹; a — абсолютная влажность воздуха, г/м³; T — температура, К; P — общее давление, атм; k_0, k_1, k_2, n и H — параметры подгонки. Параметр k_0

находился таким образом, чтобы величины произведения $k_1 \cdot T^n k_0$ в (1) при $T = 296$ К, рассчитанные по данным [13] и настоящей статьи, были равны между собой. Такой способ нахождения k_0 обусловлен тем, что в [13] экспериментально выявлена часть коэффициента поглощения, зависящая от общего давления, а нами такого исследования не проводилось. Другие параметры (1) находились методом наименьших квадратов после деления коэффициентов континуального поглощения на абсолютную влажность воздуха. В результате проведенных расчетов были получены следующие значения параметров подгонки: $k_0 = 2,05 \text{ атм}^{-1}$, $k_1 = 4,11 \cdot 10^{-11} \text{ г}^{-1} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}^{-3} \cdot \text{км}^{-1}$, $k_2 = 8,61 \cdot 10^{-7} \text{ г}^{-2} \cdot \text{м}^6 \cdot \text{км}^{-1}$, $n = 3$ и $H = 1988$ К.

На рисунке значками (4, 5 и 6) показаны экспериментальные значения α_k при изменении температуры воздуха от 263 до 308 К, а сплошными и штриховыми линиями нанесены кривые, рассчитанные по формуле (1) и данным [13] для трех температур и $P = 0,967$ атм.

Из рисунка видно, что значения α_k при температурах 285–298 и 298–308 К хорошо вписываются в соответствующие коридоры, ограниченные кривыми 1–2 и 2–3. Экспериментальные значения с температурами 263–308 К описываются формулой (1) (с параметрами подгонки, полученными в настоящей статье) со среднеквадратическим отклонением $0,006 \text{ км}^{-1}$, причем при $a < 10 \text{ г/м}^3$ это отклонение составило $0,004 \text{ км}^{-1}$, а при $a > 10 \text{ г/м}^3$ – $0,008 \text{ км}^{-1}$. Данные [13] неудовлетворительно описывают наши натурные значения α_k . Так, 90% его значений при 285–298 и 298–308 К не попадает в коридоры 1', 2' и 2', 3'. Разница между расчетами по [13] и экспериментальными значениями α_k в температурных интервалах 263–285, 285–298 и 298–308 К достигает 0,02, 0,04 и 0,05 км^{-1} соответственно.

Первый (линейный) член в (1) соответствует поглощению, связанному со взаимодействием молекул $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$, второй (квадратичный) – $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [21]. Представляет интерес сравнить температурные зависимости двух частей континуального поглощения с данными [13]. Результаты такого сравнения приведены в табл. 1.



Зависимость коэффициентов континуального поглощения парами воды от абсолютной влажности воздуха в области 10,6 мкм для $P = 0,967$ атм (кривые 1, 2 и 3 – расчет по (1); кривые 1', 2' и 3' – расчет по [13]; 1, 1' – $T = 285$; 2, 2' – $T = 298$; 3, 3' – $T = 308$ К; 4, 5 и 6 – эксперимент; 4 – $263 < T \leq 285$; 5 – $285 < T \leq 298$; 6 – $298 < T \leq 308$ К)

Таблица 1

Температурная зависимость двух частей континуального поглощения ($\% \cdot \text{град}^{-1}$) в области 10,6 мкм

Данные	$\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$			$\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$		
	Температура, К					
	285	300	308	285	300	308
(1)	+1,05	+1,00	+0,97	-2,4	-2,2	-2,1
[13]	+0,53	+0,50	+0,49	-2,5	-2,3	-2,2

Из таблицы видно, что температурная зависимость линейного члена примерно на $0,5\% \cdot \text{град}^{-1}$ больше, а квадратичного меньше на $0,1\% \cdot \text{град}^{-1}$ по абсолютной величине, чем по [13]. Общая темпе-

ратурная зависимость континуума по (1) и [13] для диапазона относительной влажности воздуха (r) 25÷95% и трех значений абсолютной влажности приведена в табл. 2. Как видно из таблицы, абсолютная величина температурной зависимости в обоих случаях увеличивается с ростом относительной влажности и для указанных условий составляет по (1) от минус 0,7 до минус 1,6% · град⁻¹, что на 0,3–0,4% · град⁻¹ меньше, чем по [13].

Для сравнения вкладов в континуум линейного и квадратичного членов (1) с данными других авторов представим коэффициент континуального поглощения в упрощенном виде

$$\alpha_k = k_3(T, P) a + k_4(T) a^2.$$

Таблица 2

Общая температурная зависимость континуума (% · град⁻¹) в области 10,6 мкм

Данные	$r, \%$			
	25	55	75	95
$a = 5 \text{ г/м}^3$				
(1)	-0,7	-1,2	-1,4	-1,5
[13]	-1,1	-1,6	-1,7	-1,8
$a = 10 \text{ г/м}^3$				
(1)	-0,9	-1,3	-1,5	-1,6
[13]	-1,3	-1,6	-1,8	-1,9
$a = 20 \text{ г/м}^3$				
(1)	-1,0	-1,4	-1,5	-1,6
[13]	-1,3	-1,7	-1,8	-1,9

В табл. 3 приведены значения k_3 и k_4 по данным разных авторов в области 10,6 мкм для $P = 1$ атм и трех температур. По параметру k_3 наши результаты хорошо соответствуют данным [7, 13], а заметные расхождения наблюдаются с [5, 12]. По параметру имеет место хорошее соответствие только с [5]. Результаты других работ дают более высокие значения k_4 . В последнем столбце табл. 3 приведены значения α_k , рассчитанные при $a = 10 \text{ г/м}^3$, откуда видно, что расчеты по (1) дают меньшие значения коэффициентов поглощения по сравнению с данными других авторов. Значения α_k , рассчитанные по (1), наиболее соответствуют результатам [13].

Таблица 3

Данные	$k_3, \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{м}^3$	$k_4, \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$	$\alpha_k, \text{ км}^{-1}$
$T = 283 \text{ К}$			
(1)	0,0028	0,00097	0,125
[12]	0,0014	0,00181	0,195
[13]	0,0031	0,00121	0,152
$T = 296 \text{ К}$			
(1)	0,0033	0,00071	0,104
[7]	0,0033	0,00091	0,124
[13]	0,0033	0,00088	0,121
$T = 300 \text{ К}$			
(1)	0,0034	0,00065	0,099
[5]	0,0055	0,00066	0,121
[12]	0,0018	0,00117	0,135
[13]	0,0034	0,00080	0,114

Таблица 4

Коэффициенты континуального поглощения (км⁻¹) в области 10,6 мкм

Данные	$r, \%$			
	25	45	75	95
$a = 5 \text{ г/м}^3$				
(1)	0,034	0,037	0,041	0,043
[13]	0,039	0,044	0,050	0,053
$a = 12 \text{ г/м}^3$				
(1)	0,119	0,133	0,151	0,160
[13]	0,133	0,155	0,180	0,193
$a = 20 \text{ г/м}^3$				
(1)	0,249	0,284	0,325	0,347
[13]	0,276	0,328	0,386	0,417

В табл. 4 приведены результаты расчета коэффициентов континуального поглощения по данным [13] и формуле (1) для четырех значений относительной влажности и трех значений абсолютной

влажности воздуха. Из таблицы следует, что разница между результатами [13] и (1) увеличивается с ростом относительной и абсолютной влажности воздуха. Величина этого различия при $a = 20 \text{ г/м}^3$ ($r = 95\%$) достигает $0,07 \text{ км}^{-1}$.

В заключение сформулируем основные результаты.

1. Получены параметры подгонки аппроксимационного выражения, которое используется для расчета коэффициентов континуального поглощения в области $10,6 \text{ мкм}$.

2. Выявлена общая отрицательная температурная зависимость континуума, которая составила $-0,7 \dots -1,6\% \cdot \text{град}^{-1}$ в диапазоне относительных влажностей воздуха $25-95\%$.

3. Получены положительная температурная зависимость линейного члена коэффициента континуального поглощения, составившая $+0,97 \dots +1,05\% \cdot \text{град}^{-1}$ в диапазоне температур $285-308 \text{ К}$, и отрицательная температурная зависимость его квадратичного члена, равная $-2,1 \dots -2,4\% \cdot \text{град}^{-1}$.

1. Bignell K.J. // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1970. V. 96. № 409. P. 390–403.
2. Tomasi C., Guzzi R., Vittori O. // J. Atm. Sci. 1974. V. 31. № 1. P. 255–260.
3. Адикс Т.Г., Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М., Семенов А.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1975. Т. 11. № 7. С. 690–695
4. Roberts R.E., Selby J.E.A., Biberman L.M. // Appl. Optics. 1976. V. 15. № 9. P. 2085–2090.
5. Shumate M.C., Menzies R.T., Margolis J.S., Rosengrin L. // Appl. Optics. 1976. V. 15. № 10. P. 2480–2488.
6. Парамонова Н.Н., Казакова К.В., Броунштейн А.М. // Тр. ПГО. Вып. 369. Л.: Гидрометеониздат, 1976. С. 72–85.
7. Nordstrom R.J., Thomas M.E., Peterson J.C., Damon E.K., Long R.K. // Appl. Optics. 1978. V. 17. № 17. P. 2724–2729.
8. Peterson J.C., Thomas M.E., Nordstrom R.J., Damon E.K., Long R.K. // Appl. Optics. 1979. V. 18. № 6. P. 834–841.
9. Арэфьев В.Н., Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М., Сизов Н.И. Континуальное поглощение излучения $8-13 \text{ мкм}$ водяным паром. М., 1979. 34 с. (Препринт/ИФА АН СССР).
10. Макаров А.С. Исследование закономерностей изменения спектральной прозрачности приземной атмосферы в диапазоне $0,5-25 \text{ мкм}$. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань: ГИПО, 1979. 185 с.
11. Шукуров А.Х. Некоторые закономерности ослабления излучения атмосферой в «окнах прозрачности» оптического диапазона спектра. М., 1982. 51 с. (Препринт/ИФА АН СССР).
12. Loper Gary L., O'Neill Mauree A., Gelbwachs Jerry A. // Appl. Optics. 1983. V. 22. № 23. P. 3701–3710.
13. Арэфьев В.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 10. С. 1034–1054.
14. Grant William B. // Appl. Optics. 1990. V. 29. № 4. P. 451–462.
15. Волков А.Н., Пхалатов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. Ч. III С. 228–231.
16. Пхалатов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Взаимодействие излучения с дисперсными средами. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 75–81.
17. Бадинов И.Я., Гальцев А.П., Никольский Г.А. // Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1963. № 2. С. 113–126.
18. Веретенников В.В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 10. С. 1026–1033.
19. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1042–1049
20. Войцеховская О.К., Кузнецов С.В., Сапожников С.В. и др. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 3. № 9. С. 938–953.
21. Фомин В.В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности. Новосибирск: Наука, 1986. 232 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
25 декабря 1992 г.

N.N. Shchelkanov, Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov. Field Investigations of the Water Vapor Continuous Absorption in the Region of $10.6 \text{ }\mu\text{m}$.

Some results of field measurements of the water vapor continual absorption in the region of $10.6 \text{ }\mu\text{m}$ are presented. The values of fitting parameters of the approximating expression used for calculations of the coefficients of continual absorption are obtained. The gradient of the temperature dependence of the linear term in the expression for continual absorption coefficient was found to be $+0.97$ to $+1.05\% \text{ deg}^{-1}$ in the temperature range 285 to 308 К , while the temperature gradient of the squared term was -2.1 to $2.4\% \text{ deg}^{-1}$.