

Н.Н. Щелканов

О нелинейной зависимости непрерывного ослабления оптического излучения в видимой и инфракрасной областях спектра от абсолютной влажности воздуха

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 21.11.2000 г.

На основе экспериментальных данных, полученных на протяженных трассах в природных условиях и в лабораторной кювете, показано, что минимальные значения коэффициентов ослабления в области спектра 0,44–11,5 мкм зависят от абсолютной влажности воздуха нелинейным образом. Сделано предположение, что физическая природа выявленного эффекта заключается в поглощении излучения слабо связанными молекулярными комплексами водяного пара. Полученные коэффициенты поглощения имеют нейтральный ход в видимой и ближней ИК-областях спектра и увеличиваются по мере продвижения в длинноволновую область, а их величина в рамках квадратичной зависимости от абсолютной влажности воздуха составляет примерно $0,000090-0,000145 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$.

Введение

Одной из важных задач современной климатологии является исследование природы аномального (избыточного) поглощения коротковолнового оптического излучения в облаках, которое проявляется в том, что поглощение излучения, полученное в природных измерениях полных потоков над и под облаками, часто превышает поглощение, рассчитанное с помощью радиационных моделей, учитывающих вклад всех газов. Очевидно, что выявление природы обнаруженного поглощения очень важно для количественной оценки основных факторов, влияющих на альbedo Земли и определяющих ее радиационный баланс, как при наличии облаков, так и в безоблачной атмосфере.

Для объяснения природы этого явления в настоящее время имеется несколько гипотез [1–6]. В [1, 2] основной причиной аномального поглощения коротковолнового излучения предполагается наличие в межкапельном пространстве облака тонкодисперсной фракции аэрозоля, имеющего преимущественно сажевый состав и не проявляющего себя в рассеянии. В [3] избыточное поглощение радиации в облаках связывается с континуальным поглощением водяного пара в коротковолновой области спектра.

В работе [4] предполагается, что кроме поглощающего аэрозоля заметную роль в аномальном поглощении коротковолновой радиации в облаках вносит увеличение вклада молекулярного рассеяния за счет роста длины свободного пробега фотонов при многократном рассеянии. В [5] утверждается, что наблюдаемое в облаках избыточное поглощение в действительности является кажущимся и обусловлено горизонтальным переносом излучения в стохастически неоднородном облаке. Наконец, в [6] на основе модели многослойной концентрически-неоднородной водной капли показано, что аномальное поглощение коротковолновой радиации в облаках может быть объяснено неаддитивным поглощением света частицами атмосферной дымки, находящимися в составе жидкокапельных облаков. Но вопрос о природе избыточного поглощения все еще остается дискуссионным.

Нами предпринята попытка связать избыточное поглощение с наблюдаемым в натурном эксперименте непрерывным ослаблением видимой и ИК-радиации, зависящим от абсолютной влажности воздуха. Нужно заметить, что вообще выделение непрерывного ослабления из измерений спектрального пропускания атмосферы в природных условиях представляется весьма сложной задачей, так как оно очень мало и в большинстве случаев полностью маскируется аэрозольным ослаблением радиации субмикронными и грубодисперсными частицами. Чтобы минимизировать этот фактор, данные по пропусканию атмосферы, полученные в условиях высокой прозрачности атмосферы, необходимо корректировать на аэрозольное ослабление, а оценки величины непрерывного ослабления делать по минимальным точкам.

1. Условия эксперимента

Для решения поставленной задачи был сформирован массив спектральных коэффициентов общего ослабления излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 0,44 \div 11,5$ мкм, полученных из измерений пропускания атмосферы на трассе длиной 4630 м в районе оз. Балхаш (Казахстан), характеризующейся очень высокой метеорологической дальностью видимости [7].

Измерения спектральной прозрачности осуществлялись с помощью аппаратного комплекса [8] на следующих длинах волн: 0,44; 0,48; 0,55; 0,69; 0,87; 1,06; 1,22; 1,60; 2,17; 3,97; 9,2; 10,6 и 11,5 мкм. Для выделения необходимой длины волны использовались интерференционные ($\lambda = 0,44 \div 2,2$ мкм) и комбинированные ($\lambda > 3$ мкм) светофильтры. Полуширина фильтров составляла около 0,010 мкм в видимой области спектра, 0,015–0,020 мкм в области 0,8–2,2 мкм и 0,15–0,30 мкм в области 3,97–11,5 мкм. Случайная среднеквадратическая погрешность вычисления коэффициентов общего ослабления не превышала $0,007 \text{ км}^{-1}$ в диапазоне длин волн $0,44 \div 1,06$ мкм и $0,010 \text{ км}^{-1}$ в области 1,06–11,5 мкм. Для

расширения диапазона изменения абсолютной влажности воздуха в данный массив включались реализации, полученные в разные сезоны года (весна, лето, осень).

Сформированный таким образом массив состоял из 48 реализаций спектров коэффициентов общего ослабления и соответствующих им значений абсолютной влажности воздуха, которая для повышения точности измерялась интегрально по трассе оптическим методом в полосе поглощения водяного пара в области $\lambda = 0,94$ мкм. Относительная влажность воздуха в период измерений изменялась от 40 до 93%, температура воздуха – от -10 до $+35$ °С, абсолютная влажность воздуха – от $1,23$ до $18,7$ г/м³, скорость ветра – от $1,6$ до $8,8$ м/с.

2. Результаты

В наших работах [9, 10] получены зависимости непрерывного ослабления в области спектра $0,44 \div 3,97$ мкм от абсолютной влажности воздуха в рамках линейной зависимости $\alpha_{\text{непр}} = k_{\text{погл}} a$, где $\alpha_{\text{непр}}$ – коэффициент непрерывного ослабления; $k_{\text{погл}}$ – коэффициент поглощения; a – абсолютная влажность воздуха. Коэффициенты поглощения получены в [9] по минимальным точкам, в [10] – методом наименьших квадратов с экстраполяцией в «0», а их значения оказались равными $0,012$ – $0,018$ и $0,020$ – $0,028$ г⁻¹·см² соответственно.

В настоящей статье приводятся результаты исследования непрерывного ослабления, во-первых, во всей области спектра – $0,44 \div 11,5$ мкм, во-вторых, в рамках не только линейной, но и нелинейной зависимости от абсолютной влажности воздуха, и, в третьих, из общего ослабления, кроме континуального поглощения парами воды и селективного поглощения атмосферными газами, исключалось ослабление субмикронной фракцией аэрозольных частиц [11]. Разность между общим ослаблением и исключенными компонентами представляет собой остаточное ослабление, которое состоит из ослабления грубодисперсной фракции аэрозольных частиц и непрерывного ослабления.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов остаточного ослабления от абсолютной влажности воздуха для нескольких длин волн видимой и ИК-областей спектра. Здесь точки – экспериментальные данные. Видно, что зависимости коэффициентов остаточного ослабления от абсолютной влажности воздуха являются нелинейными. Этот вывод подтверждают кривые 1, полученные методом наименьших квадратов. Кривые 2 представляют собой зависимости коэффициентов непрерывного ослабления от абсолютной влажности воздуха, полученные по минимальным точкам в рамках квадратичной зависимости $\alpha_{\text{непр}} = k_{\text{погл}} a^2$.

Для обоснования использования квадратичной функции, описывающей связь коэффициентов непрерывного ослабления с абсолютной влажностью воздуха, проведено исследование типа этой зависимости. Зависимости коэффициентов остаточного ослабления от абсолютной влажности воздуха задавались в виде $\alpha_{\text{ост}} = K_0 + K_1 a^n$, где $\alpha_{\text{ост}}$ – коэффициент остаточного ослабления; K_0 , K_1 и n – параметры подгонки, которые находились методом наименьших квадратов.

На рис. 2 приведен спектральный ход показателя степени n . Прямая на рис. 2 получена методом наименьших квадратов. Видно, что наблюдается небольшой рост значений n при увеличении длины волны излучения. В видимой области спектра $n = 1,45 \div 1,9$, а в дальней ИК (9–12 мкм) $n = 1,96 \div 2,56$. Значения n в видимой области спектра, полученные в натуральных условиях, хорошо соответствуют

значению $n = 1,63$, полученному в [12] на основе лабораторных данных [13] для аргонового лазера на длине волны $\lambda = 0,44$ мкм. Таким образом, зависимости коэффициентов непрерывного ослабления от абсолютной влажности воздуха оказались близкими к квадратичной.

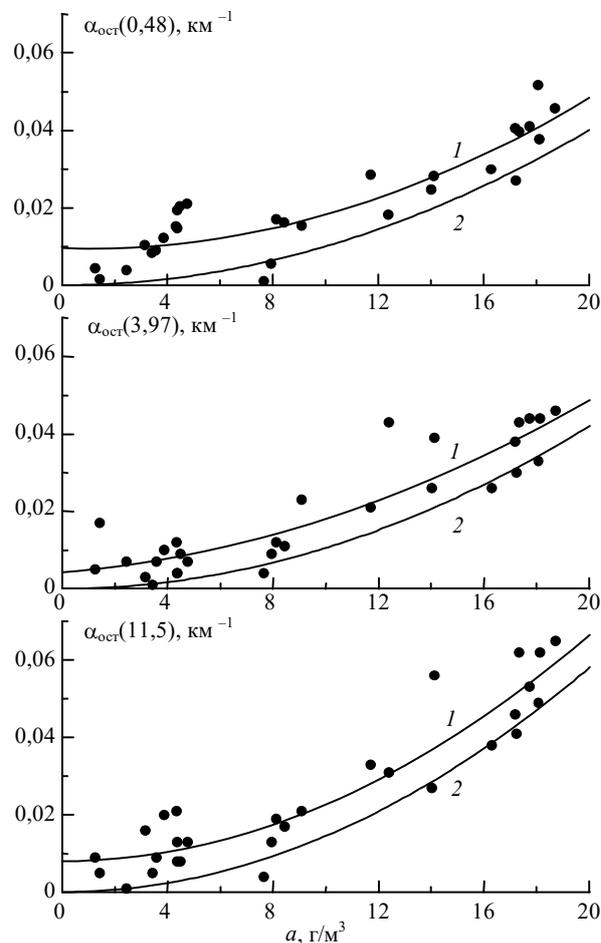


Рис. 1. Зависимости коэффициентов остаточного ослабления от абсолютной влажности воздуха для длин волн 0,48; 3,97 и 11,5 мкм

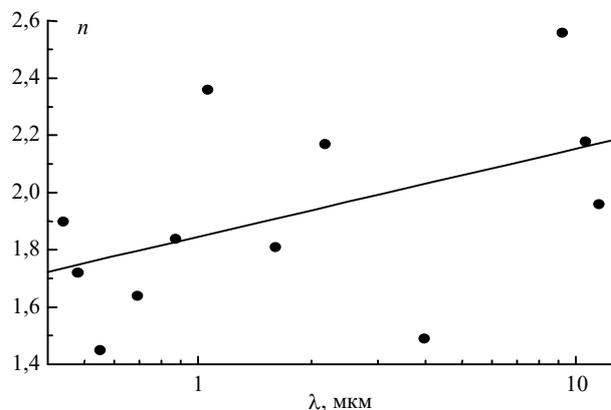


Рис. 2. Спектральный ход показателя степени n

На рис. 3 представлен спектральный ход коэффициента поглощения. В отличие от [9, 10], где $k_{\text{погл}}$ уменьшается с увеличением длины волны в видимой области спектра,

он имеет нейтральный ход в видимой и ближней ИК-областях спектра и увеличивается по мере продвижения в длинноволновую область, а по величине составляет $0,000090-0,000145 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$. Погрешность нахождения коэффициентов $k_{\text{погл}}$ составляет примерно $0,000010 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$. Кривая на рис. 3 получена методом наименьших квадратов в предположении, что спектральный ход $k_{\text{погл}}$ описывается экспоненциальной зависимостью вида $k_{\text{погл}}(\lambda) = A + B \exp(\lambda/C)$, где $A = 0,000024 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$, $B = 0,000067 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$, $C = 18,6 \text{ мкм}$.

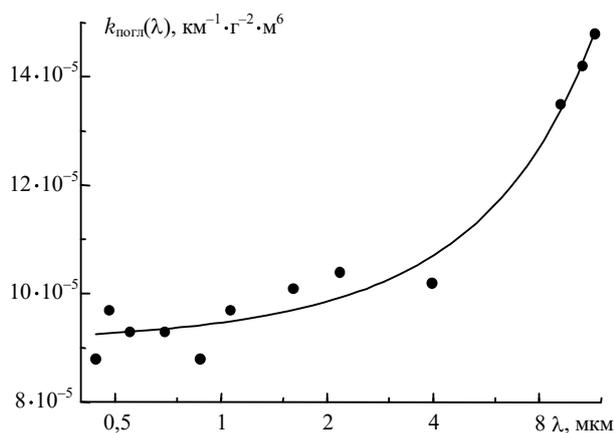


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения в области спектра 0,44–11,5 мкм

Из анализа данных, представленных на рис. 1, следует, что оценки коэффициентов поглощения в [9, 10] являются завышенными. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, неучет ослабления субмикронной фракцией частиц привел к завышению коэффициентов поглощения [9, 10] в видимой области спектра и их спектральному ходу. Во-вторых, применение метода наименьших квадратов с экстраполяцией в «0» к экспериментальному массиву с большим разбросом точек привел к дополнительному завышению коэффициентов поглощения [10] во всей области спектра. Учет этих факторов позволил получить новые данные. Поскольку зависимости коэффициентов непрерывного поглощения от абсолютной влажности воздуха являются нелинейными, то новые оценки коэффициентов поглощения, полученные в рамках линейной зависимости от абсолютной влажности воздуха, будут несколько завышены при $a < 12-15 \text{ г/м}^3$ и занижены при $a > 12-15 \text{ г/м}^3$. Значения коэффициентов поглощения в области спектра 0,44–3,97 мкм по данным разных авторов приведены в таблице.

Значения коэффициентов непрерывного поглощения $k_{\text{погл}}(\lambda)$, $\text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$, полученных на горизонтальных и наклонных трассах

λ , мкм	Данные			
	[9]	[10]	[14]	Новые
0,44	0,018	0,028	–	0,012
0,48	0,017	0,028	–	0,012
0,55	0,016	0,025	–	0,012
0,69	0,015	0,024	0,037	0,012
0,87	0,014	0,021	0,018	0,012
1,06	0,012	0,021	0,016	0,012
1,6	0,012	0,020	0,015	0,012
2,12	–	–	0,019	–
2,17	0,014	0,021	–	0,014
2,27	–	–	0,008	–
3,97	0,016	0,021	–	0,016

Данные [14] получены на наклонных трассах и скорректированы авторами [15] на континуальное и селективное поглощение парами воды.

Сопоставление этих данных показывает, что полученные коэффициенты непрерывного поглощения в рамках линейной зависимости от абсолютной влажности воздуха по абсолютной величине удовлетворительно согласуются с результатами [14], полученными на наклонной трассе. При этом сам факт близости коэффициентов поглощения на приземной и наклонной трассах свидетельствует о достоверности полученных результатов.

3. Сравнение натуральных и лабораторных данных

Для подтверждения достоверности нелинейной зависимости непрерывного ослабления от абсолютной влажности воздуха проведено сравнение результатов, полученных в натуральных условиях и в многоходовой лабораторной кювете [13] для видимой области спектра. Напомним, что в [13] представлены результаты измерения ослабления излучения аргонового ($\lambda = 0,44 \text{ мкм}$), гелий-неонового ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) и CO_2 ($\lambda = 10,59 \text{ мкм}$) лазеров водяным паром на трассе 2,98 км при различных температурах и влажностях. Оказалось, что в лабораторной кювете, как и в натуральных условиях, наблюдается рост минимальных значений коэффициентов ослабления в видимой области спектра с увеличением абсолютной влажности воздуха. На рис. 4 приведена такая зависимость для аргонового лазера (точки и светлые кружки – экспериментальные данные).

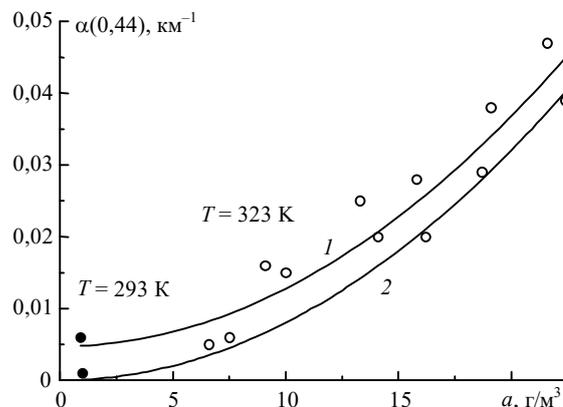


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления излучения аргонового лазера от абсолютной влажности воздуха при $T = 293 \text{ К}$ (черные точки) и $T = 323 \text{ К}$ по данным [16]

Из рис. 4 видно, что зависимость коэффициента ослабления от абсолютной влажности воздуха является нелинейной. Этот вывод подтверждает кривая 1, полученная методом наименьших квадратов. Кривая 2 найдена по минимальным точкам и представляет собой зависимость коэффициента непрерывного ослабления (от абсолютной влажности воздуха) в рамках квадратичной зависимости. Здесь величина коэффициента поглощения составила $0,000080 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$, а согласно нашим данным для этой области спектра она равна $0,000092 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$. Это различие находится в пределах величины случайной погрешности экспериментальных данных, хотя оно, возможно, указывает на отрицательную температурную зависимость ($\sim 0,7\% \cdot \text{град}^{-1}$) этого типа поглощения, так как лабораторные данные получены при $T = 323 \text{ К}$, а натурные – 303 К .

Еще одним подтверждением достоверности полученных зависимостей являются результаты сравнения непрерывного ослабления и континуального поглощения [16] в области 10,6 мкм, полученных в натуральных условиях, с данными измерений континуального поглощения в лабораторной кювете [17]. На рис. 5 представлены данные разных авторов по континуальному поглощению оптического излучения водяным паром при $T = 296$ К и непрерывному ослаблению в области спектра 10,6 мкм.

При сравнении результатов исследования континуального поглощения оказалось, что сумма коэффициентов непрерывного ослабления и континуального поглощения [16], полученных в натуральных условиях, близка к величине континуального поглощения в лабораторной кювете [17]. Различие в коэффициентах континуального поглощения, полученных в натуральных и лабораторных условиях, объясняется разными методиками их нахождения. Так, в [16] исключалось непрерывное ослабление с использованием значений коэффициентов ослабления в области спектра 1–4 мкм, а в [17] оно оставалось. Поэтому коэффициенты континуального поглощения в [16] оказались меньше примерно на величину непрерывного ослабления в области спектра 1–4 мкм.

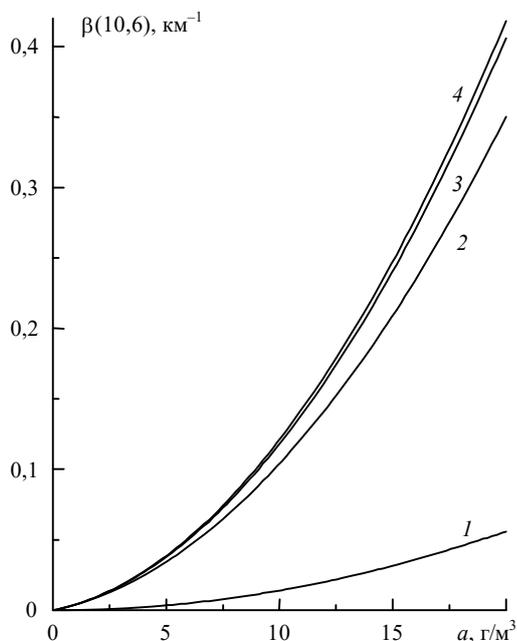


Рис. 5. Сравнение данных разных авторов по континуальному поглощению излучения водяным паром при $T = 296$ К и непрерывному ослаблению в области спектра 10,6 мкм: 1 – непрерывное ослабление; 2 – континуальное поглощение по данным [16]; 3 – сумма кривых 1 и 2; 4 – континуальное поглощение по данным [17]

4. Механизмы непрерывного ослабления

Увеличение минимальных значений коэффициентов ослабления с ростом абсолютной влажности воздуха как в натурном эксперименте, так и в лабораторной кювете может быть обусловлено следующими факторами: ослаблением субмикронного и грубодисперсного аэрозоля; поглощением парами воды и слабосвязанными молекулярными комплексами водяного пара. Рассмотрим эти факторы.

4.1. Ослабление субмикронного аэрозоля

Отсутствие зависимости непрерывного ослабления от длины волны в видимой области. Разделение коэффициентов аэрозольного ослабления на компоненты выполнено в [11]. Такие зависимости для длины волны 0,48 мкм представлены на рис. 6, из которого видно, что α и $\alpha_{\text{ост}}$ увеличиваются, а $\alpha_{\text{см}}$ уменьшается с ростом абсолютной влажности воздуха. Последнее говорит о том, что обсуждаемая зависимость не может быть объяснена ослаблением субмикронного аэрозоля. Спектра ставит под сомнение объяснение исследуемого эффекта поглощением субмикронного аэрозоля [9, 10], так как его величина должна быть обратно пропорциональна длине волны излучения. Для оценки влияния этого фактора были построены зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления α , ослабления субмикронной фракции аэрозольных частиц $\alpha_{\text{см}}$ и остаточного ослабления $\alpha_{\text{ост}}$ от абсолютной влажности воздуха в видимой и ближней ИК-областях спектра.

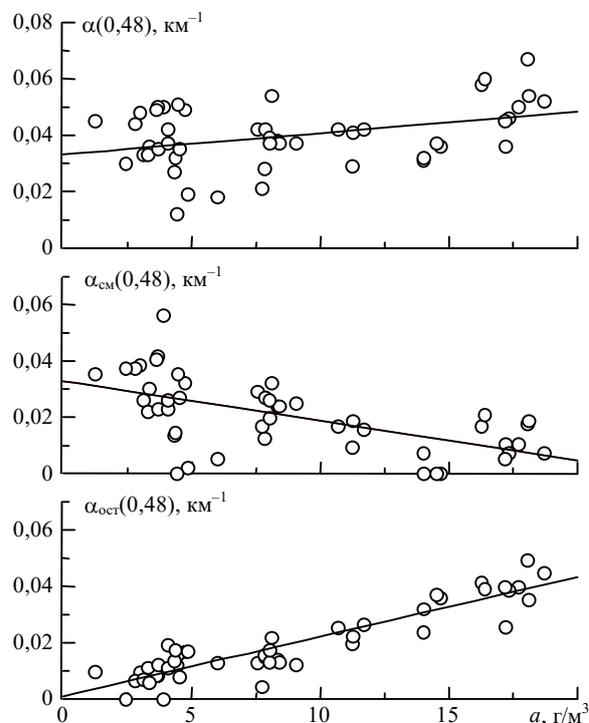


Рис. 6. Зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления α , остаточного ослабления $\alpha_{\text{ост}}$ и ослабления субмикронной фракции аэрозольных частиц $\alpha_{\text{см}}$ от абсолютной влажности воздуха в области спектра 0,48 мкм

4.2. Ослабление грубодисперсного аэрозоля

Увеличение $\alpha_{\text{ост}}$ с ростом абсолютной влажности воздуха (см. рис. 6) говорит о том, что исследуемая зависимость может быть обусловлена синхронным выносом водяного пара и грубодисперсного аэрозоля в верхние слои атмосферы с подстилающей поверхности. Чтобы исключить эту взаимосвязь, необходимо провести такие исследования в лабораторной кювете, в которой этот эффект отсутствует. Для этого были использованы экспериментальные данные, полученные в многоходовой лабораторной кювете [13]. Оказалось, что в лабораторной кювете, как и в

натурных условиях, наблюдается рост минимальных значений коэффициентов ослабления в видимой области спектра с увеличением абсолютной влажности воздуха (см. рис. 4). Расчеты скоростей седиментации капелек воды, выполненные в [13], показывают, что в установившемся режиме все крупные капельки радиусом более 0,2 мкм осядут на стенки кюветы. Кроме этого, в лабораторной кювете отсутствует механизм синхронного выноса водяного пара и грубодисперсного аэрозоля с подстилающей поверхности, приводящий к зависимости коэффициента ослабления от абсолютной влажности воздуха. Таким образом, обсуждаемая зависимость не может быть объяснена ослаблением грубодисперсного аэрозоля.

4.3. Поглощение парами воды

Для выяснения физической природы непрерывного поглощения в [15] был проведен расчет вклада континуального поглощения водяного пара в коротковолновой области спектра. Полученные значения коэффициентов континуального поглощения оказались примерно на один-два порядка ниже измеренных в [10]. Расчеты [18] показали, что поглощение излучения слабыми линиями водяного пара также не может объяснить величину непрерывного ослабления.

4.4. Поглощение слабосвязанными молекулярными комплексами водяного пара

Нейтральными поглощающими свойствами в видимой области спектра, вероятно, могут обладать слабосвязанные молекулярные комплексы водяного пара, которые согласно [19] «можно называть малыми газовыми составляющими второго рода, поскольку они есть производные обычных газовых составляющих атмосферы и существуют только в газовом окружении родительских молекул».

Зависимости непрерывного ослабления в видимой области спектра от абсолютной влажности воздуха с показателями степени $1 < n < 2$ указывают на то, что физической природой выявленного эффекта может быть поглощение двумя типами слабосвязанных молекулярных комплексов. Причем каждый из этих типов комплексов вносит заметный вклад в общее поглощение. Во-первых, это поглощение слабосвязанными молекулярными комплексами, состоящими из молекул водяного пара и других молекул воздуха. Этот тип поглощения будет линейным образом зависеть от абсолютной влажности воздуха, так как его величина пропорциональна концентрации молекул водяного пара. Во-вторых, поглощение слабосвязанными молекулярными комплексами, состоящими из кластеров водяного пара (димеров, тримеров и т.д.) и молекул воздуха. Этот тип поглощения будет квадратичным образом зависеть от абсолютной влажности воздуха. Такое предположение основано на том, что концентрация димеров является преобладающей среди кластеров водяного пара и пропорциональна квадрату абсолютной влажности воздуха [20].

Заключение

На основе анализа минимальных значений коэффициентов ослабления оптического излучения, полученных на протяженных трассах в натуральных условиях и лабораторной кювете, показано, что непрерывное поглощение в области длин волн 0,44–11,5 мкм зависит от абсолютной влажности воздуха нелинейным образом. В отличие от [9, 10], где ко-

эффициент поглощения уменьшается с увеличением длины волны в видимой области спектра, в данной работе он имеет нейтральный ход в видимой и ближней ИК-областях спектра и увеличивается по мере продвижения в длинноволновую область, а его величина в рамках квадратичной зависимости от абсолютной влажности воздуха составляет $0,000090\text{--}0,000145 \text{ км}^{-1} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{м}^6$.

Как в лабораторной кювете, так и в натуральных условиях зависимости минимальных значений коэффициентов ослабления в видимой области спектра от абсолютной влажности воздуха получились нелинейными и близкими между собой. При сравнении результатов исследования непрерывного ослабления и континуального поглощения [16] в области 10,6 мкм оказалось, что сумма коэффициентов непрерывного и континуального поглощения, полученных в натуральных условиях, близка к величине континуального поглощения в лабораторной кювете [17]. Все это позволяет говорить о достоверности результатов исследования непрерывного ослабления оптического излучения в видимой и ИК-областях спектра, зависящего от абсолютной влажности воздуха.

Получены также новые данные по коэффициентам поглощения в области спектра $0,44\pm 3,97$ мкм в рамках линейной зависимости от абсолютной влажности воздуха.

Предполагается, что выявленный эффект обусловлен поглощением излучения слабосвязанными молекулярными комплексами водяного пара.

Автор выражает свою признательность д.ф.-м.н. Ю.А. Пхалагову и д.ф.-м.н. М.В. Панченко за полезные обсуждения результатов данной работы.

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

1. Розенберг Г.В. // Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 5. С. 460–470.
2. Розенберг Г.В. // Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 11. С. 1192–1198.
3. Stephens G.L. and Si-Chee Tsay // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1990. V. 116. P. 671–704.
4. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Мельникова И.Н. // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 14–23.
5. Титов Г.А. // Оптика атмосферы и океана 1996. Т. 9. № 10. С. 1308–1318.
6. Рахимов Р.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 659–668.
7. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 10. С. 1318–1329.
8. Волков А.Н., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Материалы 8 Всес. симп. по распр. лазерн. излуч. в атмос. Томск, 1986. С. 228–231.
9. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. // IV Заседание Рабочей группы проекта «Аэрозоли Сибири»: Тез. докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1997. С. 34–35.
10. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 4. С. 315–319.
11. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. // I Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Часть 1. Томск: Изд. ТНЦ СО РАН, 1994. С. 94–95.
12. Щелканов Н.Н. // VII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Материалы симпозиума. Томск: ИОА СО РАН, 2000. С. 132–133.
13. Арэфьев В.Н., Сизов Н.Н. // Тр. ИЭМ. 1984. Вып. 14 (110). С. 93–99.
14. Tomasi C., Guzzi R. and Vittori O. // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 255–260.
15. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Теорогов С.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 131–135.

16. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 7. С. 681–687.
17. Арефьев В.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 10. С. 1034–1054.
18. Быков А.Д., Воронин Б.А., Науменко О.В., Сеница Л.Н., Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. // VII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Материалы симпозиума. Томск: ИОА СО РАН, 2000. С. 31.
19. Вигасин А.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 10. С. 1069–1088.
20. Фомин В.В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности. Новосибирск: Наука, 1986. 232 с.

N.N. Shchelkanov. On nonlinear dependence of continual attenuation of optical radiation in visible and IR spectral ranges on the absolute air humidity.

Based on the experimental data obtained along extended paths both under field and laboratory conditions, it is shown that minimum values of the attenuation coefficients within 0.44–11.5 spectral range nonlinearly depend on the absolute humidity. It is proposed that the physical nature of the effect is radiation absorption by weakly bounded molecular complexes of water vapor. The behavior of the obtained absorption coefficients is the neutral within visible and near IR spectral ranges, and they increase with shifting to the long-wave range. Their magnitude in terms of quadratic dependence on the absolute humidity is about $0.000090\text{--}0.000145 \text{ km}^{-1} \cdot \text{g}^{-2} \cdot \text{m}^6$.