

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

К ВОПРОСУ О НЕПРЕРЫВНОМ ОСЛАБЛЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

На основе данных натурных измерений спектрального пропускания атмосферы на протяженных приземных трассах в аридной зоне и в регионе Западной Сибири выявлено существование непрерывного поглощения излучения в области длин волн 0,44–3,97 мкм, имеющего положительную линейную связь с абсолютной влажностью воздуха. По величине коэффициента поглощения, равного примерно 0,02–0,03 г⁻¹см², оно значительно превышает континуальное поглощение водяного пара, а характер спектральной зависимости указывает на связь выявленного атмосферного континуума с тонкодисперсным сажевым аэрозолем. Проведено сравнение коэффициентов поглощения, полученных на приземной и наклонной трассах. Показано их удовлетворительное согласие. Предполагается, что наличие в атмосфере тонкодисперсного сажевого аэрозоля может быть одним из важных факторов аномального поглощения оптической радиации в облаках.

1. 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 из натурных измерений 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. Так, в [1] утверждается, что наблюдаемое в облаках избыточное поглощение в действительности является кажущимся и обусловлено горизонтальным переносом излучения в стохастически неоднородном облаке. Предполагается, что расхождение между экспериментом и модельными расчетами можно устранить, если провести пространственное усреднение экспериментальных данных по участкам длиной ~6 км и более.

В ряде работ избыточное поглощение в облаках связывается с наличием в атмосфере конкретной поглощающей компоненты. В частности, в [2, 3] 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 соответствии с этой гипотезой поглощение излучения в облаках должно быть слабо селективным и проявляться во всей области оптического диапазона длин волн. Это предположение в целом соответствует экспериментальным данным [4], представляющим собой спектральные зависимости коэффициента поглощения тонкодисперсной фракции аэрозоля в

области спектра 0,25–0,8 мкм для аэрозольных проб, собранных в горах Абастумани.

В работе [5] 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. Это обстоятельство должно проявляться в усилении спектральной зависимости коэффициентов поглощения в видимой области длин волн. Наконец, в [6] избыточное поглощение радиации в облаках связывается с континуальным поглощением водяного пара в коротковолновой области спектра. Для количественной оценки этого поглощения в [6] использовалась эмпирическая формула, предложенная ранее в [7] для области 3,3–4,2 мкм.

Экспериментальное подтверждение существования слабого поглощения водяным паром в диапазоне длин волн 0,648–3,97 мкм в натуральных условиях было получено в [8] из измерений оптической толщи безоблачной атмосферы $\tau(\lambda)$ на наклонных трассах (относительная погрешность измерений составляла около 25%). Абсолютные значения коэффициентов поглощения $k(\lambda)$ определялись по наклону зависимости $\tau(\omega)$ (где ω – осажденный слой паров воды) и составляли от 0,015 до 0,067 г⁻¹см².

Для выяснения физической природы обнаруженного в [8] поглощения в [9] был проведен расчет вклада континуальной компоненты водяного пара в этом диапазоне длин волн. Расчет проводился в предположении, что континуальное поглощение в видимой и ближней ИК-области спектра, как и в области 8–12 мкм, в основном обусловлено далекими крыльями линий водяного пара. Для количественных оценок использовался лорентцевский контур крыла линии, обрезанный на расстоянии 500 см⁻¹.

Рассчитанные таким образом значения можно рассматривать как верхнюю границу коэффициента

континуального поглощения. Расчеты показали, что даже завышенные значения коэффициентов континуального поглощения по величине оказались примерно на один-два порядка ниже измеренных в [8]. Это означает, что в чистой атмосфере, а следовательно и в облаках, основной вклад в поглощение коротковолнового излучения вносит не континуум водяного пара, а какая-то другая поглощающая субстанция.

2. Предполагая, что за счет турбулентной диффузии эта субстанция достаточно равномерно перемешана в атмосфере, в данной работе была предпринята попытка выявить непрерывное поглощение коротковолновой радиации на приземной трассе, где можно реализовать более высокую точность измерений. Нужно заметить, что вообще выделение непрерывного поглощения в коротковолновой области спектра из измерений спектрального пропускания атмосферы $T(\lambda)$ в натуральных условиях представляется весьма сложной задачей, так как оно очень мало и в большинстве случаев полностью маскируется аэрозольным рассеянием радиации субмикронными частицами. Чтобы минимизировать этот фактор, нужны данные по пропусканию атмосферы, полученные в очень чистых условиях и на достаточно протяженной трассе. Последнее условие необходимо для повышения точности определения $T(\lambda)$.

3. С учетом сказанного для решения поставленной задачи был сформирован массив спектральных коэффициентов общего ослабления излучения $\epsilon(\lambda)$ в диапазоне длин волн 0,44–3,97 мкм, полученных нами из измерений пропускания атмосферы в районе озера Балхаш, характеризующейся очень высокой метеорологической дальностью видимости в теплое время года [10], и в районе г. Томска (Западная Сибирь) в антициклональных условиях при видимости выше 40 км [11]. Измерения $T(\lambda)$ осуществлялись с помощью аппаратных комплексов [12] и [13] соответственно. Для выделения необходимой длины волны использовались интерференционные ($\lambda = 0,44$ – $2,2$ 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 $\lambda = 0,8$ – $2,2$ мкм и 0,15 мкм в области $\lambda = 3,97$ мкм. Среднеквадратичная погрешность измерений T_λ (при $T < 0,8$) не превышала 2% в диапазоне длин волн 0,44–1,06 мкм и 3% в области 1,06–3,97 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 включал в себя 35 реализаций $\epsilon(\lambda)$ и соответствующие им значения абсолютной влажности воздуха $-a$, 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 изменя-

лась от 40 до 93%, температура воздуха – от -10 до $+32$ °С, абсолютная влажность воздуха – от 1,23 до 18,7 г/м³, скорость ветра – от 1,6 до 8,8 м/с.

По полученным данным, так же как и в [8], были построены зависимости коэффициентов ослабления излучения $\epsilon(\lambda)$ для длин волн $\lambda = 0,44; 0,48; 0,55; 0,69; 0,87; 1,06; 1,22; 1,60; 2,17$ и 3,97 мкм от абсолютной влажности воздуха. Для иллюстрации часть этих зависимостей (для шести длин волн) представлена на рис. 1 по балхашским (●) и томским (○) данным.

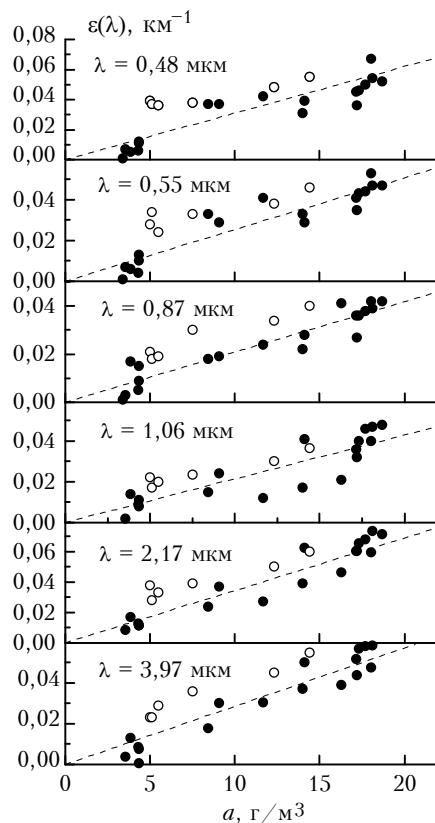


Рис. 1. Зависимость коэффициентов общего ослабления от абсолютной влажности воздуха для шести длин волн, полученных в районе оз. Балхаш (●) и в г. Томске (○). Прямые регрессии получены методом наименьших квадратов с экстраполяцией в «0»

Видно, что в пределах имеющегося разброса точек коэффициенты $\epsilon(\lambda)$, как и в [8], имеют положительную связь с абсолютной влажностью воздуха. Проведенный статистический анализ выявил существенно значимую корреляцию между этими параметрами (с коэффициентами корреляции 0,88–0,96). В рамках линейного приближения, методом наименьших квадратов, были найдены спектральные коэффициенты общего поглощения $k(\lambda)$, связанные с водяным паром. Учитывая, что измерения пропускания атмосферы проводились с конечным спектральным разрешением, полученные коэффициенты для заданных значений температуры и влажности воздуха расчетным путем были скорректированы на селективное поглощение излучения парами воды. Рас-

чет был выполнен авторами работы [9] с применением базы данных [14]. В результате были получены коэффициенты непрерывного поглощения $k_{\text{непр}}(\lambda)$, которые по своему смыслу представляют собой «атмосферный континуум» (в соответствии с терминологией [9]).

Сводка общих коэффициентов поглощения и соответствующих им коэффициентов непрерывного поглощения дана в таблице. Здесь же для сравнения приведены выборочные (для близких длин волн) значения $k_{\text{непр}}(\lambda)$, рассчитанные по данным [8]. Сопоставление этих данных показывает, что полученные нами коэффициенты непрерывного поглощения по абсолютной величине в основном вполне удовлетворительно согласуются с данными [8] за исключением нескольких точек на краях рассматриваемого диапазона, что может быть связано с недостатком информации в [8] для корректного учета селективной компоненты пропускания в этих участках спектра. При этом интересен сам факт близости коэффициентов поглощения, полученных на приземной и наклонной трассах, свидетельствующий о хорошей пространственной перемешанности поглощающей субстанции. Какова же наиболее вероятная природа этой субстанции?

Значения общих коэффициентов поглощения $k(\lambda)$ и соответствующих им коэффициентов непрерывного поглощения $k_{\text{непр}}(\lambda)$ ($\text{г}^{-1}\cdot\text{см}^2$), полученных в данной работе и в [8]

Длина волны λ , мкм	$k(\lambda)$	$k_{\text{непр}}(\lambda)$ (данная работа)	$k_{\text{непр}}(\lambda)$ (данные [8])
0,44	0,028	0,028	–
0,48	0,028	0,028	–
0,55	0,025	0,025	–
0,65	–	–	0,040
0,69	0,028	0,024	0,028
0,87	0,0205	0,0205	0,018
1,06	0,021	0,021	0,018
1,22	0,032	0,022	0,023
1,60	0,021	0,0204	0,016
2,17	0,0345	0,021	0,018
3,97	0,029	0,021	0,083

Выше уже было показано, что расчеты континуального поглощения водяного пара в коротковолновой области спектра дают величины, которые на два порядка меньше измеренных значений $k_{\text{непр}}(\lambda)$, и поэтому для физической интерпретации природы атмосферного континуума нужно привлекать другие факторы. В этой связи представляет интерес анализ спектральной зависимости полученных коэффициентов непрерывного поглощения, которая в относительных единицах приведена на рис. 2 (кривая 1).

Из рисунка видно, что атмосферный континуум заметно убывает с ростом длины волны в видимой области спектра и остается практически неизменным в инфракрасном диапазоне. По данным [4] подобный характер в видимом диапазоне длин волн имеют спектры поглощения тонкодисперсного аэрозоля, содержащего сажевую компоненту и

не проявляющего себя в рассеянии. Один из таких спектров, полученный для диапазона длин волн 0,37–0,63 мкм, приведен на рис. 2 (кривая 2) также в относительных единицах. Видно, что в перекрывающейся области спектра (0,44–0,63 мкм) кривые 1 и 2 действительно имеют качественно подобную спектральную зависимость.

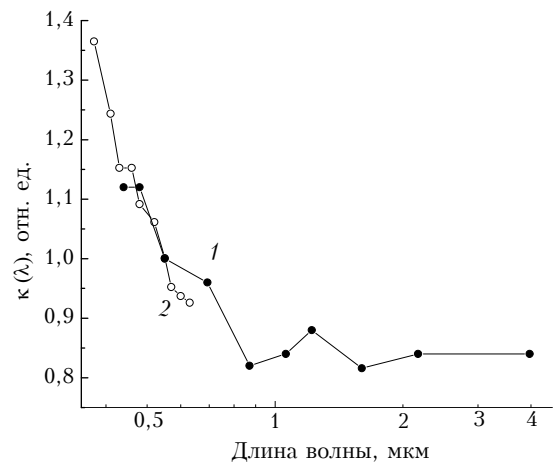


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента непрерывного ослабления коротковолнового оптического излучения в приземной атмосфере (кривая 1) и спектр поглощения тонкодисперсного аэрозоля, содержащего сажевую компоненту [4] (кривая 2)

Учитывая, что в ИК-области поглощение тонкодисперсного аэрозоля практически нейтрально по спектру (за исключением полос поглощения), можно предположить, что в формировании атмосферного континуума заметную роль играет тонкодисперсный сажевый аэрозоль, концентрация которого каким-то образом связана с абсолютной влажностью воздуха (см. рис. 1).

Подобная интерпретация ближе всего соответствует гипотезе, высказанной в [2, 3], согласно которой именно сажевая компонента тонкодисперсного аэрозоля является важным радиационным фактором в коротковолновой области спектра. Если при этом принять сделанное в [3] предположение о том, что накопление тонкодисперсного аэрозоля идет на термодинамически устойчивых кластерах воды, то становится понятной и связь обсуждаемого непрерывного ослабления с абсолютной влажностью воздуха. В пользу такой интерпретации свидетельствуют и выводы работы [15], в которой высказывается мнение о существовании в атмосфере неселективного «серого» поглотителя, как очень важного климатического фактора в условиях безоблачного неба. Значительный вклад поглощающего тропосферного аэрозоля в уменьшении альбедо системы «атмосфера – подстилающая поверхность» отмечается также в [16].

В качестве другого, но достаточно близкого, физического механизма формирования атмосферного континуума можно рассматривать поглоще-

ние коротковолнового излучения фрактальными структурами, состоящими из водных кластеров и кристаллического углерода (сажи). Это заключение основано на данных [17], где приведена относительная спектральная зависимость коэффициента поглощения коротковолновой радиации в такой системе, достаточно хорошо согласующаяся со спектральным ходом коэффициента непрерывного ослабления, представленного на рис. 2.

Резюмируя сказанное, можно отметить следующее. Из измерений спектрального пропускания атмосферы на приземной трассе получены данные, свидетельствующие о существовании атмосферного континуума в видимой и ближней ИК-области спектра. По величине коэффициента ослабления, равного примерно $0,02-0,03 \text{ г}^{-1}\cdot\text{см}^2$, он на два порядка превышает континуальное поглощение водяного пара, а по характеру спектральной структуры ближе всего соответствует поглощению излучения тонкодисперсным сажевым аэрозолем. Хорошее количественное соответствие коэффициентов поглощения, полученных в приземном слое (настоящая работа) и на наклонных трассах [8], свидетельствует о равномерном распределении поглощающей субстанции в тропосфере, что косвенно подтверждает предположение о её тонкодисперсности. В случае, когда тонкодисперсный поглощающий аэрозоль находится в межкапельном пространстве облака, при многократном рассеянии фотонов он может быть одним из важных факторов аномального поглощения оптической радиации в облаках.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-05-65994).

1. Тутов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1308–1318.
2. Розенберг Г.В. // Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. N 5. С. 460–470.
3. Розенберг Г.В. // Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. N 11. С. 1192–1198.
4. Любовцева Ю.С., Яскович Л.Г. // Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. N 9. С. 922–932.
5. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Мельникова И.Н. // Метеорология и гидрология. 1996. N 2. С. 14–23.
6. Stephens G.L. and Si-Chee Tsay // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1990. V. 116. P. 671–704.
7. Thomas M.E. and Delaye C.J. // Proc. of the 14th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models. 1991. 11–12 June. P. 342–349.
8. Tomasi C., Guzzi R. and Vittori O. // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 255–260.
9. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 2. С. 131–135.
10. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 10. С. 1318–1329.
11. Пхалагов Ю. А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 6. С. 720–726.
12. 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.
13. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 667–671.
14. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H. et al. // JQSRT. 1992. V. 48. P. 469–507.
15. Eiden R., Eschelbach G. // Z. Geophys. 1973. V. 39. P. 189–228.
16. Тарасова Т.А., Фейгельсон Е.М. // Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. N 11. С. 1199–1206.
17. Андреев С.Д., Михайлов Е.Ф. // Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. N 6. С. 808–817.

Поступила в редакцию
16 декабря 1997 г.

Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, N.N. Shchelkanov. About Continuous Attenuation of Optical Radiation in Shortwave Spectral Range.

Based on field measurements of atmospheric spectral transmission on extended ground paths within arid zone and in West Siberia region, a continuous absorption of radiation within 0.44–3.97 mm wavelength has been found being linearly depended on the air absolute humidity. By the magnitude of its absorptance ($\approx 0.02-0.03 \text{ г}^{-1} \text{ см}^2$), it noticeably exceeds the continuous absorption of water vapour; and the character of its spectral dependence points to its connection with finely dispersed soot aerosol. The absorptances obtained on the ground and slant paths have been compared. A satisfactory agreement between them is shown. The presence of finely dispersed soot aerosol in the atmosphere is assumed to be one of important factors of the optical radiation absorption by clouds.